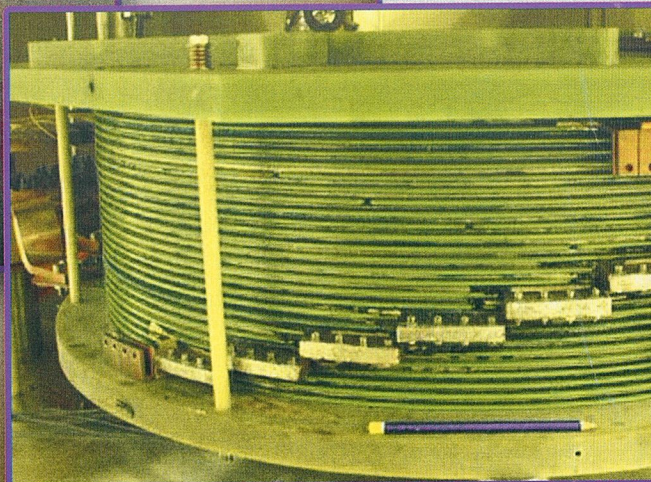
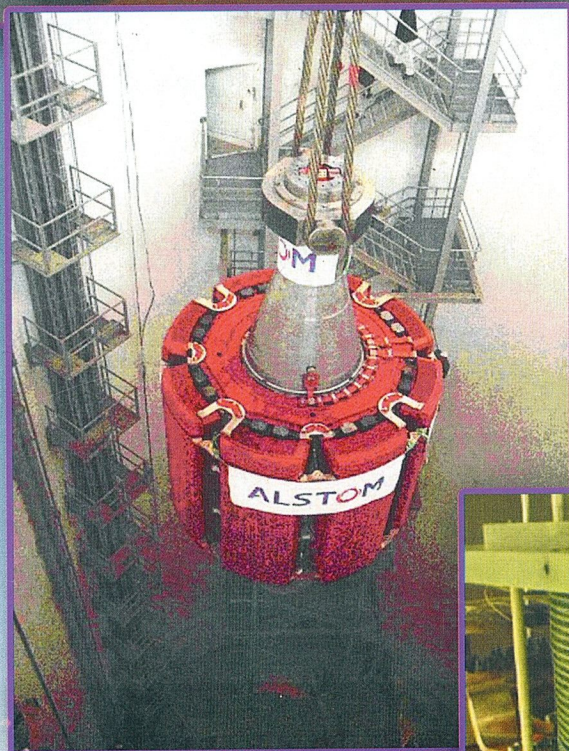
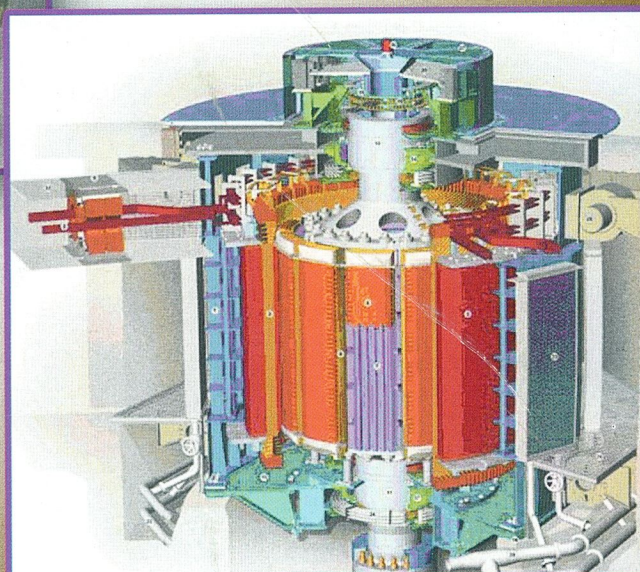
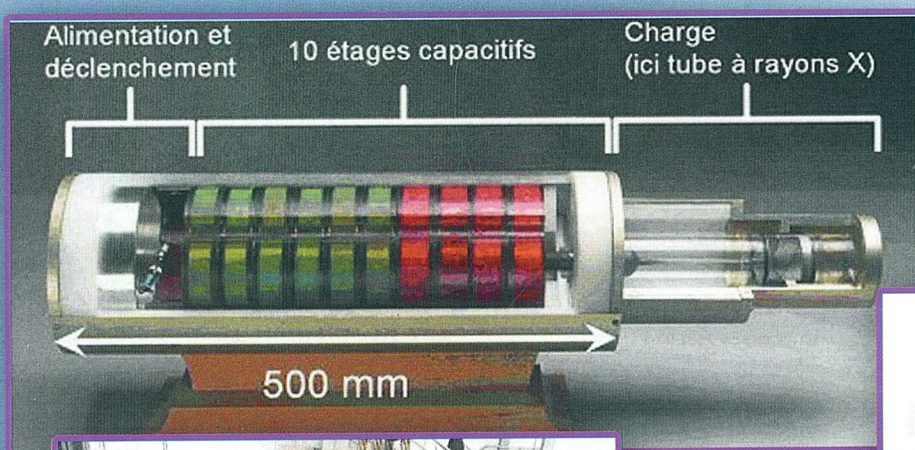


La Revue **SEE.I**



Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>



**Stockage
d'énergie**

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



**Société de l'Electricité, de l'Electronique
et des Technologies de l'Information
et de la Communication**

N° 49 - Juin 2007

RÉSÉLEC

Réseau National de Ressources en Électrotechnique

NOUVEAUTÉS

nouveaux référentiels

habilitation électrique

productions

contributions

évènements

concours

communiquer

forum

liens

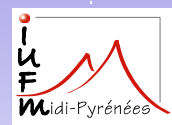
partenaires industriels

présentation de Résélec

contacts

rechercher

ministère
éducation
nationale
enseignement
supérieur
recherche



Nos missions 2006 / 2007 :

Production de ressources pédagogiques innovantes en génie électrique

- ◆ pour l'accompagnement de la rénovation
 - du BTS Électrotechnique,
 - du référentiel "Habilitation électrique",
- ◆ et le développement de la formation en économie d'énergie, éco conception, énergie renouvelables.

Missions antérieures :

Élaboration de documents pédagogiques pour

- ◆ le CAP PROELEC,
- ◆ le Bac Pro ELEEC,
- ◆ le BEP des métiers de l'électrotechnique,
- ◆ l'habilitation électrique.

www.iufmrese.cict.fr

Contacts :

Responsable pédagogique : Pascal MAUSSION
pmaussio@cict.fr
Chargé de la communication : Michel LEFÈVRE
mlefevre@cict.fr

Réseau National de Ressources en Électrotechnique
IUFM Midi-Pyrénées Site de Ranguel 118 route de Narbonne
31078 TOULOUSE CEDEX 4
Tél.: 05 62 25 21 85 ~ Télécopie: 05 62 25 21 58

BULLETIN D'ABONNEMENT A LA REVUE 3EI

Année 2007 – 2008

N°51 (décembre 2007), n°52 (mars2008), n°53 (juin 2008), et 54 (septembre 2008).

Abonnement individuel :

Adresser le bulletin ci dessous, accompagné d'un chèque libellé à l'ordre de :

SEE- la revue 3EI

à l'adresse suivante

SEE-la revue 3EI

17 rue Hamelin , 75783 PARIS CEDEX 16

D'un montant de : 36 € TTC pour la France et pays de la CEE

Ou de : 46 € TTC pour les pays hors CEE

Nom :.....**Prénom**

Adresse d'expédition de la revue 3EI :

Rue, n° :.....

Code postal :..... **Ville :**.....

Pays :.....

Adresse électronique :.....

Activité (pour statistiques) :.....

Abonnement souscrit pour une collectivité (bibliothèque , CDI, laboratoire, entreprises, université, école d'ingénieur, lycée, IUT ...)

52 € TTC pour la France et pays de la CEE

65 € TTC pour les pays hors CEE

Prendre soin de mentionner sur le bon de commande le lieu de livraison de la revue ainsi que le destinataire (personne physique ou service). Expédier le bon de commande à

SEE-la revue 3EI

17 rue Hamelin , 75783 PARIS CEDEX 16

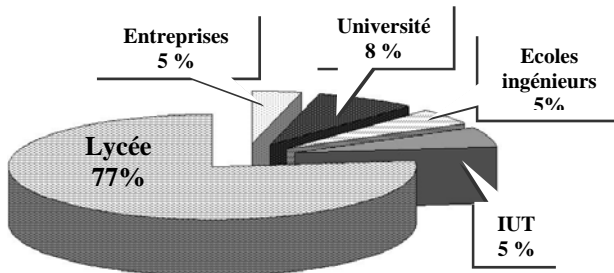
Résultats de la consultation 2007 : 83 réponses/601 abonnés

Profil du lectorat

- Formation initiale*

Génie Electrique	Physique Appliquée	Physique Chimie
54 %	43 %	3 %

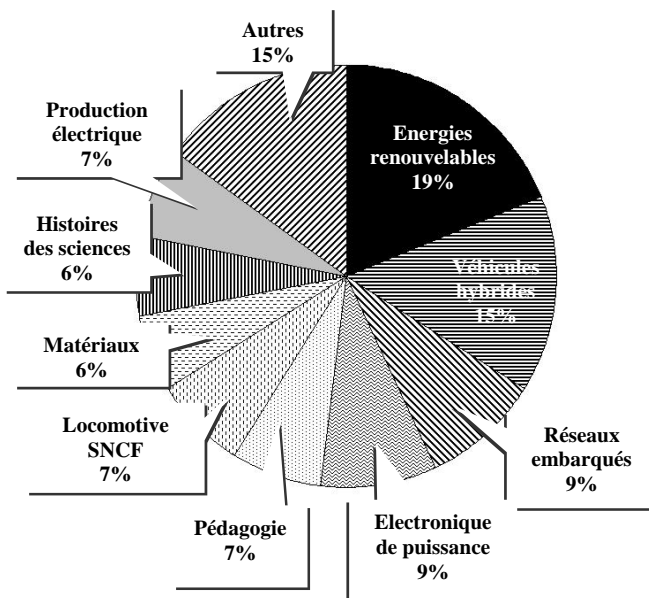
- Employeur*



- Intérêt pour les domaines*

Electro- -technique	Electronique de puissance	Automatique	Autres
36 %	32 %	25 %	7 %

Thèmes les plus intéressants (derniers numéros)



Date du premier abonnement à la revue

Début	Avant 1999	Après 1999
48 %	31 %	21 %

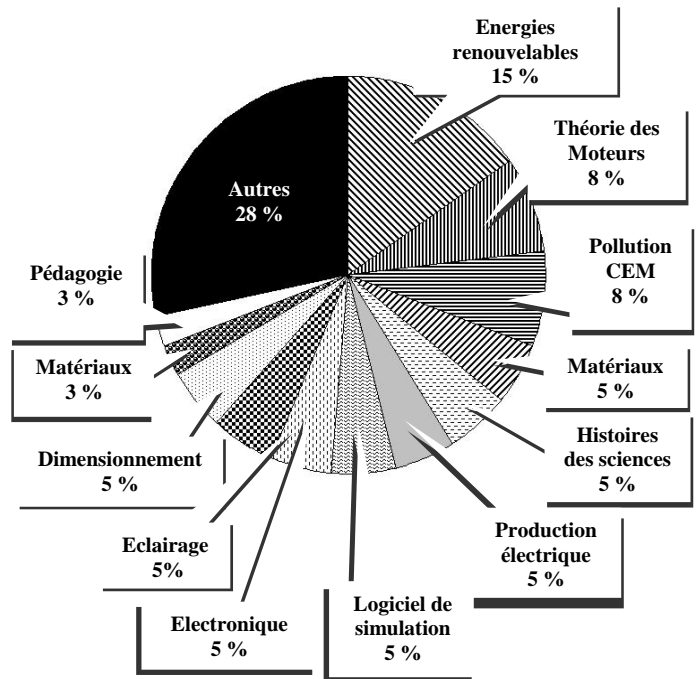
Avis sur les derniers numéros

93 % des lecteurs se déclarent satisfaits du fond de la revue. En revanche, seulement 46 % des lecteurs trouvent satisfaisant la lisibilité des graphes et schéma et la qualité des reproductions de photos.

Projet fiches métiers

	Oui	Non
Proposition intéressante	92 %	8 %
Contact étudiants	26 %	74 %

Thèmes à traiter en priorité (futurs numéros)





SOCIETE de l'ELECTRICITE, de l'ELECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.

17, rue Hamelin, PARIS 75 783 CEDEX 16
Tel : 01 56 90 37 00 Fax : 01 56 90 37 19
site web : www.see.asso.fr

La Revue 3EI
publication trimestrielle
du Cercle Thématique 13-01
de la SEE

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886
Siret 785 393 232 00026, APE 731 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

3EI : Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue Hamelin 75 783 PARIS CEDEX 16	Sommaire du n°49
	Thème : Stockage d'énergie .
Directeur de la publication Alain BRAVO Président de la SEE	p. 3 Editorial, p. 5 Publications, Informations,
Rédacteur en Chef François BOUCHER	Thème.
Adresser les propositions d'article à F. Boucher : revue3ei.art@voila.fr	p. 8 Les supercondensateurs P. SIMON P. L. TABERNA C. PORTET Université Paul SABATIER TOULOUSE
Communication Micheline BERTAUX communication@see.asso.fr	p. 15 Elements d'étude d'un système de stockage d'énergie électrique : le supercondensateur E. HOANG G. FELD B. REVOL D. PENARD ENS et IUT CACHAN
Publicité en Régie TRENDICE CONSEIL	p. 22 Réalisation et essais d'un SMES haut Tc de 800 kJ P. TIXADOR B. BELLIN M. DELEGLISE J.C. VALLIER A. ALLAIS M. AMIET CNRS GRENOBLE , NEXANS France , DGA/DET/CEP
Philippe MINGORI 01 45 74 96 47	p. 31 Les générateurs de Marx de conception ISL B. MARTIN P. DELMOTE Institut de recherches Franco-Allemand SAINT LOUIS
Martine FERRON 01 45 74 96 48	p. 37 Turbines pompes et alternateurs-moteurs de centrales hydrauliques G. HEMERY J.B. HOUDELIN ALSTHOM POWER (France)
Abonnement (4 numéros par an) déc. 2006, mars, juin, sept. 2007. tarifs TTC :	Applications Industrielles, Recherche et développement
<u>Individuel</u> :	p. 46 Que mesure t'on avec un capteur de couple dynamique ? P. BRUNET Lycée Benjamin Franklin ORLEANS
France et CEE.....35 € Pays hors CEE.....45 €	p. 51 Comprendre les harmoniques et leurs effets M. GUILLET J.C. GUIGNARD J.C. SCHUBENEL LINA IUT ANGERS
<u>Collectivités</u>	Sciences appliquées
France et CEE.....50 € Pays hors CEE.....63 €	p. 57 Capteurs industriels , mesure de débit, niveaux et températures P. QUIRIN Lycée louis Vincent METZ
Réalisation et impression Repro-Systèmes 23, rue de Verdun 77 181 Le Pin	p. 63 L'approche énergétique dans les systèmes électromécaniques O. BARRE P. BROCHET Lycée G. EIFFEL L2EP LILLE.
Routage et Expédition Départ Presse ZI les Richardets 93 966 Noisy le Grand	Histoire des sciences et des techniques.
Dépôt Légal : Juin 2007	p. 71 L'introduction de l'enseignement de l'automatique en France P. REMAUD Ecole supérieure d'ingénieurs de Poitiers POITIERS
Commission Paritaire 1207 G 78028 ISSN 1252-770X	

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente édition, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'oeuvre dans laquelle elles sont incorporées.

Toutefois des copies peuvent être utilisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris, auquel la Revue 3EI a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs. (loi du 11 mars 1957, art.40 et 41 et Code Pénal art. 425).

Avec ce numéro s'achève le thème du **stockage de l'énergie** pour lequel nous avons recueilli beaucoup d'articles. Dans cette seconde partie, deux articles concernent les super condensateurs ; sont présentés également les inductances supraconductrices appelées SMES (Superconductor Magnetic Energy Storage), les générateurs de Marx et le pompage-turbine.

Les articles initialement prévus dans ce numéro sur le vieillissement des batteries d'accumulateurs au Plomb et sur l'influence de la température sur les super condensateurs, plus périphériques par rapport au thème, seront publiés ultérieurement, dans une rubrique hors thème.

Ce mois-ci, la **rubrique hors thème** accueille deux articles sur la compréhension des harmoniques et l'étude d'un couplemètre dynamique.

Dans la rubrique **Enseignement des Sciences Appliquées** vous trouverez un article sur les capteurs industriels et une approche énergétique des systèmes électromécaniques.

Avec Mr Remaud nous apprendrons comment l'automatique a été introduite dans l'enseignement en France en lisant l'article qu'il propose dans la rubrique **Histoire de l'Automatique**.

Nous terminerons la parution annuelle de nos quatre numéros par un numéro académique qui, comme annoncé précédemment, sera réalisé par des collègues ou industriels de l'académie de Lille

Le thème «**Gisements d'économie d'énergie**» sera traité dans le numéro de Décembre 2007 ; les thèmes probables pour l'année 2008 seront «**Les piles à combustibles**» en mars 2008, et pour tenir compte des résultats de la consultation c'est-à-dire du désir de nos lecteurs de voir aborder des sujets plus «**électroniques**», les «**FPGA**» (Field Programmable Gate Array) en Juin 2008.

Nous remercions nos lecteurs pour les réponses que nous avons obtenues à la consultation lancée dans les numéros précédents et dont nous publions les résultats. Nous allons essayer de tenir compte des critiques formulées au sujet de la qualité des photos, des graphiques et des dessins : ces documents pourraient être prochainement accessibles sur le site RESELEC

Vous trouverez également dans ce numéro un bulletin de réabonnement pour l'année 2007/2008. En effet l'année dernière en raison de la parution tardive du numéro de Septembre certains établissements avaient eu du mal à se réabonner. Les réabonnements tardifs entraînent alors à leur tour des retards dans les dates de parution des numéros suivants.

Pour que cette revue qui contribue à la transmission des connaissances puisse continuer de paraître, nous avons toujours besoin de votre aide. Nous comptons sur vous pour saisir toutes les occasions pour faire connaître et faire vivre notre revue. Une attention particulière doit être portée à l'information en direction des jeunes collègues que nous souhaiterions voir abonnés en plus grand nombre.

ABONNEZ-VOUS !!!! et FAITES CONNAITRE LA REVUE !!!!

Comité de publication :

Bonne lecture.

Le Comité de Publication de la Revue3EI

La Revue 3EI
Comité de publication

Hamid BEN AHMED
Jean BONAL
François BOUCHER
Lucien DESCHAMPS
Jean FAUCHER
Gilles FELD
Jean-Philippe ILARY
Chérif LAROUCI
Marie Michèle LE BIHAN
Franck LE GALL
Sylvaine LELEU
Pascal LOOS
Claude OBERLIN
Oviglio SALA
Jean-François SERGENT
Jean-Claude VANNIER
Pierre VIDAL

Pour vos insertions publicitaires, contacter :
TRENDICE CONSEIL

Philippe MINGORI
01 45 74 96 47

Martine FERRON
01 45 74 96 48

Abonnement à la Revue 3EI, année 2006-2007 :

Numéros : 47 (décembre 2006), 48 (mars), 49 (juin) et 50 (septembre 2007).

<u>Abonnement individuel :</u>	<u>Abonnement collectif souscrit par bon de commande (bibliothèque, CDI, laboratoire, entreprise, etc.)</u>
France et Pays de la CEE : 35 €, TTC	France et Pays de la CEE : 50 €, TTC
Pays hors CEE : 45 €, TTC	Pays hors CEE : 63 €, TTC

Une seule adresse :

La Revue 3EI - SEE,
17, rue Hamelin, 75 783 PARIS Cedex 16

pour nous contacter au sujet de votre abonnement écrivez à
revue3ei.cour@voila.fr



Régulation Industrielle – Septembre 2007

Sous la direction d'Emmanuel Godoy

Dunod

Cet ouvrage présente l'ensemble des techniques et méthodes de régulation, appliquées à l'industrie. Une première partie est consacrée aux outils de modélisation (Matlab) et d'analyse.

C'est dans une seconde partie que les éléments composant les chaînes d'asservissement ou de régulation comme les différents types d'actionneurs et leurs modèles, éléments de commande en électronique de puissance, mesures et capteurs sont abordés. Différents exemples d'applications sont également présentés.



Guide de la mesure électrique - Octobre 2007 *Bâtiment et industrie*

Christian Peutot, Eric Félice et Alain Kolher

Dunod

Seul et unique «traité de terrain» de la mesure électrique, cet ouvrage fournit à l'ingénieur ou au technicien, en milieu industriel ou BTP, toutes les informations dont il a besoin pour faire face à toute mesure électrique : les équipements de mesure (leurs spécificités, leur utilisation...) ; les différentes méthodes de mesure (comment les choisir puis les mettre en œuvre) ; de très nombreuses et précieuses informations pratiques. Ce livre permettra à un technicien de choisir la méthode la plus adaptée.



Commande électronique des moteurs électriques – *2ème édition*

Michel Pinard

Dunod

Cet ouvrage dresse un large panorama des aspects théoriques et appliqués de la commande électronique des moteurs électriques, et plus largement des aspects électrotechniques de la régulation industrielle et des asservissements. Cette nouvelle édition, mise à jour et enrichie, consacre une plus large place aux logiciels de CAO : SIMULINK pour la simulation et LabVIEW pour l'expérimentation (représentation de la transformation de Park sur les moteurs triphasés et visualisation de régimes transitoires du couple des moteurs synchrone et asynchrone). Illustré de très nombreux exemples industriels, cet ouvrage est l'outil de travail indispensable des électroniciens, électrotechniciens, automaticiens, spécialistes de la régulation et des asservissements.



La pile à combustible – juin 2007

Structure - Fonctionnement – Applications

Méziane Boudellal

Dunod

L'incertitude liée aux énergies conventionnelles (gaz, pétrole, etc.), l'augmentation des besoins et la possibilité de production d'énergie décentralisée avec des systèmes peu ou non polluants sont autant de facteurs qui suscitent l'intérêt de la pile à combustible. Cet ouvrage définit les principes liés à cette nouvelle forme de production d'énergie, présente les différents types de pile à combustible, donne les domaines d'applications (du téléphone portable à la centrale) et expose le cadre normatif en vigueur.



Génie électrotechnique

Sous la direction de F. Warne

Dunod

Cet ouvrage rassemble tout ce qu'il faut savoir de l'électrotechnique. Après quelques rappels des notions de base, il présente un large panorama des dispositifs classiques de l'électrotechnique (moteurs, transformateurs, fusibles...) mais aussi des notions plus rares mais non moins utiles comme les batteries, l'usage des dispositifs électriques en atmosphère explosive ou sur les règles de sécurité. Chaque chapitre a été rédigé par un spécialiste du domaine, professeur d'université ou plus souvent professionnel du secteur.



Guide de la protection des équipements électriques

L.G. Hewitson (Traduction revue par Michel Pinard)

Dunod

Très appliqué, ce guide propose toutes les informations utiles dans le domaine de la protection électrique des appareils électriques, électroniques et électrotechniques. Les causes de dysfonctionnement possible (court-circuit, hausse de tension...), les méthodes de diagnostic et de prévention (coordination graduelle des retards d'interruption, mesures...), les matériels de protection (fusibles, disjoncteurs...) et leurs périphériques (batteries d'appoint, relais...) sont ainsi successivement abordés. L'ouvrage privilégie l'étude de cas et la présentation de tableaux et schémas, synthétiques et fonctionnels.



Le Bus USB (+ nouveau CD-Rom) Guide du concepteur

Xavier Fenard

Dunod

La nouvelle édition de ce livre, mise à jour et enrichie, présente tous les aspects théoriques et pratiques des bus USB. Sont ainsi présentés successivement les spécifications de l'USB1, l'USB2 et l'USB maître, les principaux circuits (anciens et nouveaux) et les platines prototypes disponibles sur le marché. Sont ensuite développés les environnements matériels et logiciels d'un développement de projet pour, enfin, éclairer le lecteur sur les interfaces USB et leurs aspects matériels et logiciels. De précieuses informations sont, enfin, proposées en annexe sur le montage des composants CMS, les logiciels de CAO ou les drivers.

Lire la revue 3EI c'est bien et même très bien,

Lire la revue 3EI en étant abonné c'est encore mieux !!!!

NOUVEAUTES DU RESELEC

* Logiciel BTS Électrotechnique : lire simultanément les référentiels et les Repères (19/06/2007)
http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2006/Toulouse/logiciel/BTS_Electrotechnique.shtml

* TP sur un système photovoltaïque, Bac Pro ELEEC (19/06/2007)
<http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2006/GrenobleLP/PV.shtml>

* Principe du bus CAN et mise en œuvre, BTS Electrotechnique et BTS IRIS (30/05/2007)
<http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2005/LimogesLT/busCAN.shtml>

* Agrégation interne de GE, session 2007 (24/05/2007)
<http://www.iufmrese.cict.fr/concours/2007/AgInt/AgInt2007.shtml>

* "Énergie et développement durable" : articles et diaporamas des JEEA 2007 (10/05/2007)
<http://www.bretagne.ens-cachan.fr/jeea2007/>

- Trophée Legrand 2007 : concours, en ligne, pour tous les élèves de GE (27/04/2007),
http://www.legrand.fr/pro-elec/legrand-trophee-legrand-2007_6_1075.html
- TP de raccordement d'une grille de fausse coupure, CAP PROELEC (30/03/2007)
<http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2005/Toulouse/CapProelec/RGFC.shtml>
- TP d'extension d'un éclairage communicant, Bac Pro ELEEC (29/03/2007),
<http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2005/GrenobleLP/EclairageCommunicant.shtml>
- Logiciel : Les énergivores, cadre : "Les Trophées e-students", Université de Poitiers (29/03/2007)
<http://www.iufmrese.cict.fr/contrib/2007/EnergieEtDD/logicielEnergivores.shtml>
- TP de mesures industrielles, BEP des métiers de l'électrotechnique (28/03/2007)
<http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2005/Reims/MesuresIndustrielles.shtml>
- Rénovation de la série STI : Bac Énergie et environnement (27/03/2007)
<http://eduscol.education.fr/D0238/accueil.htm>

Deux manifestations très intéressantes

- Course de vélos électriques, 3ème édition, ENS de Cachan, 12 mai 2007 (11/10/2006)
<http://www.association-meet.ens-cachan.fr/>
- CETSIS 2007, un colloque sur l'enseignement du génie électrique, à Bordeaux du 29 au 31 octobre 2007 (10/10/2006) sur <http://www.cetsis.org/>

Et toujours

- Nouveau Référentiel de formation à la prévention des risques d'origine électrique
<http://www.iufmrese.cict.fr/referentiels/2006/HabilitationElectrique/Referentiel.shtml>
- Nouveau Référentiel du BTS Electrotechnique
<http://www.iufmrese.cict.fr/referentiels/2006/BTS/Electrotechnique.shtml>
- N'hésitez pas à nous proposer vos travaux pour mise en ligne dans la rubrique "Contributions"
<http://www.iufmrese.cict.fr/contrib/>

Bonne découverte et cordialement,

Pascal MAUSSION pascal.maussion@toulouse.iufm.fr

Responsable pédagogique du Réseau National de Ressources en Electrotechnique (RéSéLec)

Responsable Département. Génie Electrique et Energétique de l'IUFM Midi Pyrénées

Responsable groupe CODIASE au LAPLACE (LABoratoire PLAsmas et Conversion de l'Energie)

INP Toulouse- ENSEEIHT-Université Paul Sabatier-CNRS

Les supercondensateurs

Patrice SIMON, Pierre-Louis TABERNA, C. PORTET

Université Paul Sabatier, CIRIMAT, 118 route de Narbonne 31062 Toulouse Cedex

Résumé Les supercondensateurs sont des systèmes de stockage électrochimique de l'énergie présents depuis quelques dizaines d'années dans de nombreuses applications d'électronique de puissance. Aujourd'hui, l'électrification croissante des moyens de transports mène à repenser la gestion des sources d'énergie embarquées. Dans un environnement dans lequel se pose de plus en plus la problématique de sources dédiées de puissance, le supercondensateur est un des acteurs en mesure d'apporter une réponse. D'importants travaux de recherche sont menés en vue d'augmenter l'autonomie de ces systèmes qui reste encore limitée à quelques secondes. Une meilleure compréhension des phénomènes physiques se déroulant aux électrodes a permis, récemment, de doubler l'énergie spécifique de ces systèmes, ouvrant ainsi la porte à un champ plus étendu d'applications.

1. Le stockage réversible de l'énergie électrique

Il existe trois grands types de systèmes permettant de stocker réversiblement l'énergie électrique : les condensateurs diélectriques classiques, les accumulateurs ou générateurs électrochimiques secondaires et les supercondensateurs. Le stockage des charges s'effectue, selon le système, de façon faradique ou non faradique. Chacun de ces systèmes correspond à un type d'application.

Les accumulateurs sont des sources d'énergie transitoire, en ce sens qu'ils offrent des durées de décharges élevées (jusqu'à plusieurs heures) pour de faibles courants : ce sont donc des systèmes de stockage de l'énergie, dont la densité de puissance reste modeste. Les condensateurs diélectriques classiques (films, céramiques ou électrochimiques) sont eux des sources d'énergie impulsionnelles. Ils peuvent en effet se décharger à très fort courant (plusieurs dizaines d'ampères) mais uniquement pendant des temps courts (de l'ordre de la milliseconde) : c'est la définition de la puissance. Les condensateurs et les accumulateurs se trouvent donc aux extrémités du diagramme de Ragone de la Figure 1, qui représente la densité de puissance (W/kg) en fonction de la densité d'énergie Wh/kg).

Les supercondensateurs ou supercapacités à double couche électrochimiques (EDLC) ont des caractéristiques de puissance et d'énergie intermédiaires entre les condensateurs et les accumulateurs. Ils peuvent en effet fournir des densités de puissance plus élevées que les batteries et sont capables de stocker plus d'énergie que les

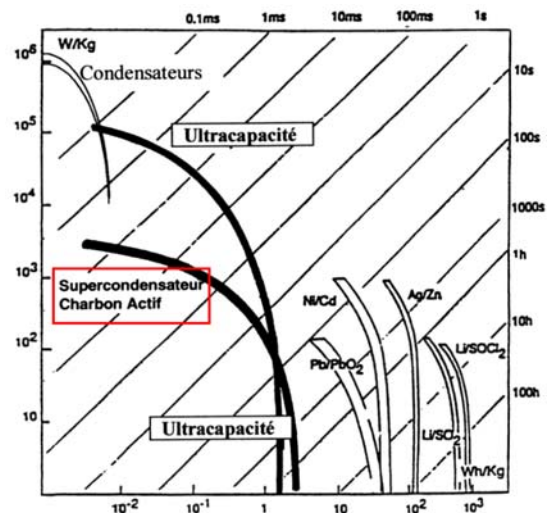


Figure 1 : Diagramme de Ragone.

condensateurs. Le Tableau 1 donne les caractéristiques

Les condensateurs classiques fonctionnent par polarisation d'un diélectrique. Les électrodes positives et négatives peuvent être toutes les deux métalliques (mylar...) mais dans certains cas l'une d'elles peut être un électrolyte liquide ou solide (aluminium, tantale). Les charges sont ainsi accumulées de part et d'autre du séparateur isolant peu épais. Les tensions appliquées peuvent atteindre des valeurs importantes, conduisant à de très fortes puissances. La densité de charge est proportionnelle à la valeur du champ électrique E dans l'isolant à la surface de l'électrode. L'énergie est stockée sous forme électrostatique avec une faible densité volumique. E étant proportionnel à la tension appliquée aux bornes, sa valeur est en moyenne comprise entre quelques centaines à quelques milliers

de kV/m. On conçoit ainsi, les très faibles valeurs d'énergie stockées par un condensateur. des principaux systèmes électrochimiques de stockage.

	Condensateurs diélectriques	Super-condensateurs	Accumulateurs
Energie massique (Wh/kg)	< 0,1	1 à 5	20 – 150
Puissance massique (kW/kg)	> 20	2 à 15	< 2
Temps de charge (s)	10^3 - 10^6	1-30	1-5 h
Temps de décharge (s)	10^3 - 10^6	1-30	0,2-10 h
Cyclabilité (cycles)	∞	10^5 à 10^6	300-10 000
Durée de vie (années)	30 et plus	30 et plus	5
Rendement énergétique (%)	≈ 100	92-98	60-90

Tableau 1 : Comparaison des performances moyennes des différents systèmes de stockage.

Les accumulateurs électrochimiques (plomb-acide, lithium-ion, nickel-métal hydrure...) stockent l'énergie électrique par le biais de réactions d'oxydo-réduction des matériaux d'électrode. Ces réactions interviennent à l'interface électrolyte/électrode impliquant des tensions de fonctionnement peu élevées. En effet, des tensions trop fortes provoqueraient l'oxydation des collecteurs de courant et l'oxydoréduction du solvant, conduisant ainsi à une dégradation totale de l'accumulateur. Aussi la puissance du système est relativement faible, même si on développe la surface et on diminue l'épaisseur des électrodes pour diminuer la résistance interne. Par contre, la capacité de stockage des charges est très importante.

Les supercondensateurs fonctionnent par l'accumulation sous courant électrique des ions de l'électrolyte au voisinage de la surface des électrodes, et plus précisément dans la double couche électrochimique [1]. Cette organisation est réversible, ce qui permet une cyclabilité importante du système. L'électrode se comporte comme une électrode bloquante idéalement polarisable, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de réactions faradiques à l'électrode lorsque

la tension croît. Notons cependant que la tension maximale est ici limitée par les potentiels de réduction et d'oxydation de l'électrolyte. Le système électrode / électrolyte se comporte comme un condensateur plan, dans lequel le solvant joue le rôle du diélectrique. La polarisation étant concentrée à cette interface électrode/électrolyte le champ électrique est très important (environ 10^{10} V/m), l'épaisseur de la double couche électrochimique étant de quelques nanomètres. Ce confinement à l'échelle nanométrique de l'énergie électrostatique est à l'origine d'une plus grande densité de charges stockées. Des densités d'énergie d'une centaine de kJ/L sont ainsi obtenues, valeur bien plus importante que celle d'un condensateur classique, mais beaucoup plus faible que celle des accumulateurs. Le supercondensateur est donc composé de deux condensateurs en série : l'un constitué de l'électrode positive associée aux anions en solution, l'autre constitué de l'électrode négative associée aux cations en solution.

Il existe trois grands types de supercondensateurs :

- les systèmes à base d'oxydes métalliques stockant l'énergie par l'intermédiaire d'une réaction de protonation à la surface d'électrodes d'oxydes de métaux nobles (RuO_2 et IrO_2) principalement. Ce sont des systèmes puissants, qui ont cependant une densité d'énergie assez faible mais qui restent très onéreux donc limitées à des marchés à haute valeur ajoutée.
- les systèmes à base de carbone, qui associent généralement deux électrodes de carbone activé. Les deux électrodes positive et négative sont identiques, ce qui fait qu'ils sont également appelés « systèmes symétriques ». Ces systèmes symétriques à base de carbone représentent environ 90% des ventes de supercondensateurs.

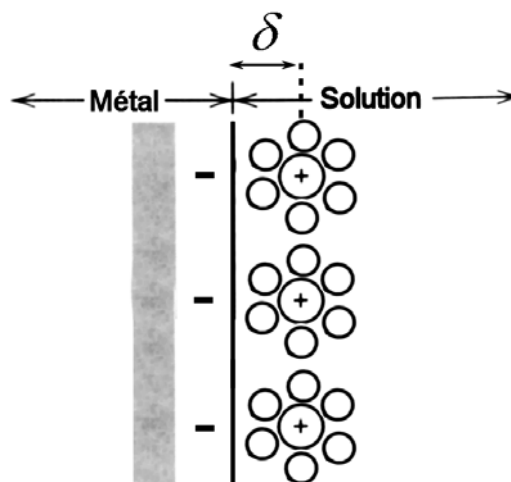


Figure 2 : Charge de la double couche électrochimique lors de la polarisation d'une électrode de carbone.

- les supercondensateurs qui associent une électrode de batterie à une électrode de supercondensateurs. Ces systèmes sont dits «hybrides» et comme ils associent deux électrodes différentes, ils sont également appelés « hybrides asymétriques »

2. Caractéristiques générales des supercondensateurs

• la tension aux bornes U

La différence de potentiel maximale aux bornes du supercondensateur (U_{\max}) dépend de la nature de l'électrolyte et des collecteurs de courant choisis. Les électrolytes aqueux ont un domaine de stabilité théorique de 1,2 V. Ils conduisent à des systèmes dont la tension nominale n'excède pas 0,8 – 0,9 V, du fait des réactions d'oxydo-réduction de l'eau apparaissant pour des potentiels inférieurs. Cependant, la conductivité de ces électrolytes est élevée (de l'ordre de la centaine de mS/cm et plus dans certains cas), ce qui conduit à des résistances spécifiques faibles pour les systèmes fonctionnant en milieux aqueux (jusqu'à environ 0,1 ohm.cm²). Au contraire, les électrolytes organiques ont un domaine de stabilité beaucoup plus étendu, de l'ordre de 3V et plus dans certains cas, mais ont une conductivité beaucoup plus faible (quelques dizaines de mS/cm dans le meilleur des cas). La différence de potentiel maximale aux bornes des supercondensateurs peut également être limitée par la corrosion du collecteur de courant et/ou l'oxydation du matériau actif d'électrode positive.

Un électrolyte typique de supercondensateur est constitué d'un solvant (type acétonitrile ou carbonate de propylène) et un sel en général fluoré (tetrafluoroborate de tetraethylamonium par exemple). Les tensions de fonctionnement des supercondensateurs à électrolyte organique sont de 2,5V.

• la capacité

La capacité (unité le Farad, F) est fonction de la nature du charbon actif et de l'électrolyte utilisés. En milieu aqueux, les meilleurs charbons peuvent atteindre 200 F/g, alors qu'en milieu organique les capacités les plus élevées sont autour de 110 F/g. L'écart observé est principalement lié aux différences de pouvoir solvatant et de constante diélectrique existant entre les différents solvants. De la valeur de la capacité dépend en particulier l'énergie stockée dans le condensateur, d'où l'importance du choix du charbon actif dans la réalisation d'un supercondensateur carbone / carbone.

• la résistance série R

La résistance série R est la résistance du supercondensateur. Elle se compose de la résistance d'électrolyte pour une grosse partie mais également des différentes résistances intervenant à l'électrode : les résistances de contact et de la résistance intrinsèque des matériaux. La résistance des systèmes fonctionnant en milieu aqueux est en général plus faible que la résistance des systèmes en milieu organique, du fait des différences de conductivité existant entre les électrolyte aqueux et ceux utilisant différents solvants non-aqueux. La résistance est une grandeur très importante car elle conditionne fortement la puissance délivrée par le supercondensateur comme il est présenté ci-dessous.

• l'énergie

L'énergie stockée dans le condensateur est donnée par

la formule $E = \frac{1}{2} C U^2$ où C est la capacité (F).

L'énergie maximale est elle donnée par

$$E_{\max} = \frac{1}{2} C U_{\max}^2$$

Les systèmes fonctionnant en milieu organique, du fait d'une différence de potentiel aux bornes plus élevée (jusqu'à 2,7 V), permettent donc de stocker une énergie plus importante que les systèmes aqueux (0,9 V maximum), mais ne peuvent fournir des puissances maximales aussi élevées que ces derniers.

• la puissance

La puissance est le produit de l'intensité par la tension ou encore l'énergie délivrée par unité de temps. Une grandeur très utilisée pour caractériser les supercondensateurs est la puissance maximale P_{\max} . Cette puissance est une valeur théorique qui correspond à la puissance délivrée lors d'une décharge à temps nul.

Elle est donnée par l'expression $P_{\max} = \frac{U_{\max}^2}{4R}$. C'est

pour cela que les systèmes devant fournir de la puissance sont généralement réalisés en milieux aqueux, du fait de la faible valeur de R qui en résulte.

Le Tableau 2 présente une liste non exhaustive des principaux fabricants de supercondensateurs dans le monde. Si une majorité des sociétés sont basées en Asie (Ness, Matsushita, Nippon Chemicon,...) une des plus actives sur le marché est l'Américaine Maxwell Technologies. Un autre point important à souligner est la présence du Français Batscap, filiale du groupe Bolloré créée en 2001 en partenariat avec EDF, qui propose des produits 2500 F dont les performances se comparent favorablement aux autres fabricant.

	Capacité (F)	Energie max. (Wh/kg)	Puissance max. (kW/kg)	Tension (V)
Maxwell Technologies (USA)	10-2000	3 - 5	5 - 10	2,3 à 2,7
Maxfarad (Corée)	6 - 250	4	6	2,5
Nippon Chemicon (Japon)	300-3000	3 - 5	8 - 12	2,3 à 2,7
Ness (Corée)	5 - 5000	3 - 5	5 - 10	2,5 à 2,7
Batscap (France)	2600	5	20	2,7
Nuintek (Corée)	5 - 60	4 - 5	7	2,5 à 2,7

Tableau 2 : Liste non-exhaustive des principaux fabricants de supercondensateurs dans le monde.

3. Les applications des supercondensateurs

Comme il est présenté plus haut, les supercondensateurs ont des constantes de temps de l'ordre de quelques secondes. Ils sont donc utilisés dans les applications nécessitant la fourniture de pics de puissance pour des durées n'excédant pas quelques secondes, typiquement inférieur à 10 s.

Ils sont tout d'abord largement utilisés en petits formats (typiquement 1-100F / 2,5V) en électronique de puissance, principalement pour la sauvegarde (UPS) ou encore comme tampon de puissance pour l'alimentation des amplificateurs pour système audio par exemple.

Si les applications industrielles des supercondensateurs de grands formats (de plusieurs centaines ou plusieurs milliers de Farads) sont à l'étude depuis plusieurs années, elles n'ont commencé qu'il y a peu et ce principalement dans le domaine du transport. Airbus utilise par exemple des supercondensateurs pour l'ouverture d'urgence des portes des A380. La société Bombardier a validé un système de tramway électrique à Mannheim alimenté par un système de biberonnage à l'aide de supercondensateurs (Mitrac Energy Saver). De nombreux constructeurs automobiles étudient également l'intégration des supercondensateurs dans les véhicules hybrides (Toyota, BMW, Subaru, Honda) principalement pour la récupération de l'énergie de freinage. Le marché de l'énergie renouvelable n'est cependant pas en reste puisque un marché important des supercondensateurs est l'orientation des pales des éoliennes.

D'autres applications, et non des moindres, concernent le domaine militaire en vue par exemple de l'élaboration des armes électriques du futur, du guidage missile, du blindage électromagnétique ou encore de l'alimentation des tourelles de chars. Dans ce cadre, la Délégation Générale pour l'Armement (DGA) finance depuis plusieurs années des travaux de recherche dans des laboratoires publics sur la caractérisation électrique de supercondensateurs mais également sur la synthèse de nouveaux matériaux pour l'amélioration des performances de ces systèmes. Le bilan des résultats obtenus au cours de ces travaux est éloquent puisqu'ils ont permis entre autre de mettre au point des traitements de surfaces des collecteurs de courant pour augmenter la puissance spécifique des supercondensateurs de 50% [2,3], et également de synthétiser des nouveaux matériaux dont les performances en énergie volumique sont doublées par rapport aux matériaux actuels [4]. Ces recherches ont été récompensées par le Prix de Thèse DGA-CNRS 2005 [5].

4. Les supercondensateurs à base de carbones activés

4.1 Les carbones activés

Grâce à leur fort pouvoir d'adsorption, les charbons actifs sont largement utilisés pour des applications diverses telles que le piégeage d'espèces gazeuses ou liquides. La première utilisation des charbons actifs pour l'adsorption réversible des charges en supercondensateurs date de 1959.

La synthèse des charbons actifs peut être réalisée à partir de précurseurs naturels comme le bois, la houille ou encore les végétaux (noyaux de fruits, tourbe...). D'autres précurseurs tels que les résines phénoliques peuvent être utilisés, mais le coût final limite alors leur application.

Les précurseurs naturels, disponibles en grande quantité, sont particulièrement attractifs. Le charbon actif peut être obtenu par procédé physique ou par procédé chimique. Dans le premier cas, le précurseur subit une carbonisation à basse température (par exemple 400°C) sous atmosphère neutre, suivie d'un traitement thermique vers 1000 °C sous atmosphère oxydante (CO₂, vapeur d'eau...) Dans le procédé chimique, la carbonisation et l'activation s'effectuent simultanément vers 700 °C sous atmosphère contrôlée, grâce à la présence d'un agent chimique (ZnCl₂, acide phosphorique...) catalysant les processus d'activation, de déshydratation, de carbonisation et de restructuration qui donnent lieu au développement de la porosité. Les précurseurs naturels, disponibles en

grandes quantités sont des matériaux de choix pour les supercondensateurs.

L'activation des charbons sert à développer de la porosité à l'intérieur des grains de carbone, ce qui a pour conséquence d'augmenter la surface totale du matériau et donc de pouvoir stocker plus de charges. Cette surface ramenée à l'unité de masse est appelée surface spécifique ; c'est une des caractéristiques des carbones activés. Elle peut se mesurer par la technique de BET (Brunauer-Emmett-Teller), qui est basée sur l'adsorption de gaz diazote de petite taille dans la porosité des matériaux étudiés. Grâce cette mesure BET, il est possible de connaître le diamètre moyen des pores ainsi que la distribution de la taille des pores autour de ce diamètre. Trois domaines de porosité sont définis selon le diamètre poreux :

- les micropores : diamètre de pores < 2 nm ;
- les mésopores : $2 \text{ nm} \leq \text{diamètre de pores} < 50 \text{ nm}$;
- les macropores : diamètre de pores > 50 nm.

La surface spécifique est un élément important puisqu'elle détermine directement la quantité de charges que l'on peut stocker et donc l'énergie. La mise au point de matériaux carbonés à haute surface spécifique est donc nécessaire, mais une attention particulière doit être portée sur la distribution de la taille des pores du carbone activé. En effet, la surface spécifique mesurée par BET ne correspond pas aux capacités obtenues dans un supercondensateur : les capacités expérimentales représentent environ 30 % de la capacité calculée à partir de la surface mesurée par BET car tous les pores ne sont pas accessibles aux ions de l'électrolyte. Si les pores créés lors de l'activation ne doivent pas être trop gros pour conduire à une augmentation significative de la surface, ils ne doivent pas non plus être trop petits pour permettre aux ions de s'adsorber lors du fonctionnement : c'est pour cela que les supercondensateurs commercialisés aujourd'hui utilisent du carbone mésoporeux, c'est à dire du carbone dont la majorité des pores ont des dimensions comprises entre 2 et 20 nanomètres.

Pour essayer de contrôler plus précisément la taille des pores des matériaux carbonés, d'autres méthodes de synthèses sont décrites dans la littérature [6]. Un exemple est la synthèse par voie « template » qui permet d'obtenir des carbones mésoporeux hautement ordonnés en utilisant une matrice silicatée mésoporeuse imprégnée par un précurseur carboné (polymère ou copolymère). L'ensemble est ensuite calciné puis le squelette de silice est dissous pour obtenir la réplique inverse de la matrice : un carbone mésoporeux. Cette méthode a pour avantage de permettre un contrôle précis de la taille des pores ; cependant, la technique utilisée et les templates de silice restent coûteux

4.2 Les caractérisations électrochimiques

Les techniques de caractérisations électrochimiques des supercondensateurs principalement utilisées sont le cyclage à courant ou puissance constante et la spectroscopie d'impédance électrochimique. La Figure 3a représente la variation de la tension aux bornes d'un condensateur en fonction du temps, lors d'un cycle de charge / décharge à courant constant

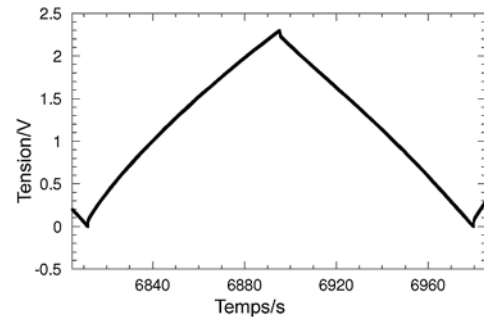


Figure 3 a : Variation de la tension en fonction du temps d'un supercondensateur 2,5F/2,3V ; cyclage à +/- 10 mA.cm²

La capacité C de la cellule est déduite de l'équation (2) suivante : $C = I / (dV/dt)$ où I est le courant (A), t le temps (s) et V la tension (V). Ce test de caractérisation est très utilisé pour mesurer la capacité des supercondensateurs, qui peut être évaluée en fonction du nombre de cycles ou en fonction du courant de charge / décharge imposé : on obtient dans ce dernier cas une courbe $C = f(I)$ caractéristique du comportement en puissance du système étudié. La Figure 3b montre la variation de la résistance interne d'un supercondensateur en fonction du nombre de cycles de charge / décharge. La résistance est stable au cours du cycles (ici 10 000 cycles de charge / décharge), ce qui montre bien la stabilité en vieillissement des supercondensateurs.

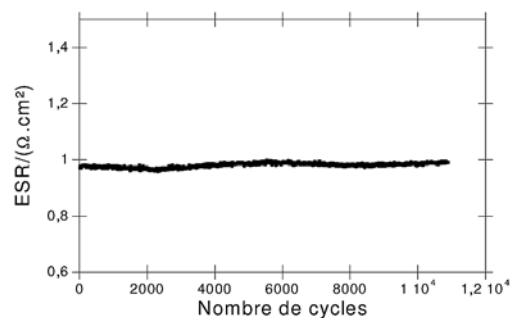


Figure 3b Variation de la résistance du supercondensateur lors du cyclage à +/- 10 mA.cm².

Le deuxième type de caractérisation électrochimique est la spectroscopie d'impédance électrochimique. Cette technique permet d'obtenir la variation de la capacité et de la résistance des supercondensateurs en

fonction de la fréquence, c'est à dire, en fonction du régime (impulsionnel) d'utilisation. Les supercondensateurs utilisant des électrodes volumiques poreuses, la capacité n'est en effet pas constante en fonction de la fréquence. Si elle est maximale à basse fréquence, elle diminue pour des temps très courts de décharge. La Figure 4a présente le diagramme d'impédance dans le plan de Nyquist d'un supercondensateur de laboratoire 2,5 F / 2,5V.

La Figure 4b montre la variation de la capacité en fonction de la fréquence calculée à partir de la représentation de Nyquist [6]. La nature des matériaux employés (électrolytes, carbone..) ainsi que l'épaisseur des films de matières active affectent de façon importante la variation de la capacité en fonction de la fréquence.

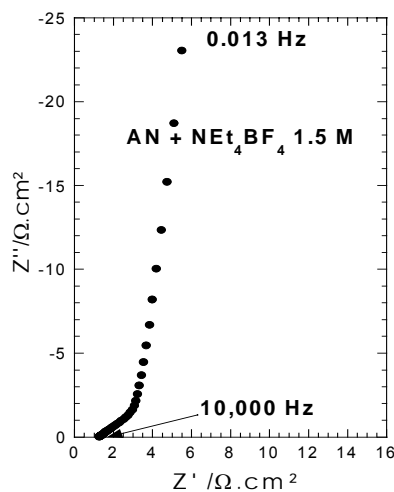


Figure 4a: Diagramme de Nyquist d'un supercondensateur 2,5F / 2,3V entre 10 kHz et 13 mHz à 2V [7].

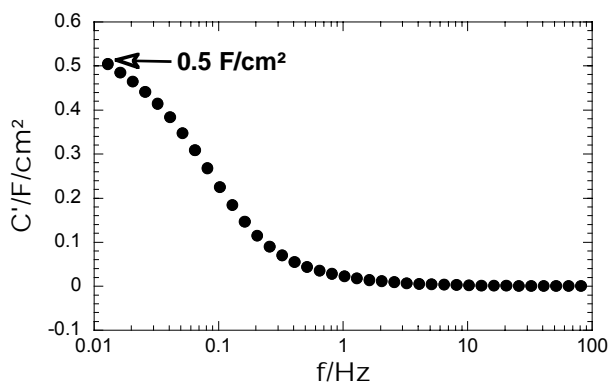


Figure 4b Variation de la capacité en fonction de la résistance obtenue à partir du diagramme de Nyquist [7].

5. Perspectives d'évolution des supercondensateurs:

5.1 Les supercondensateurs hybrides

Si les supercondensateurs possèdent des performances en puissance tout à fait remarquables pour des systèmes de stockage de l'énergie, les travaux aujourd'hui se tournent vers l'amélioration de la

densité d'énergie de ces systèmes. Plusieurs stratégies sont possibles ; la première consiste à travailler sur les matériaux carbonés, pour mettre au point des carbones permettant de stocker des quantité de charges plus importantes. Nous détaillerons ces systèmes dans le paragraphe suivant. Une autre solution consiste à associer une électrode faradique d'accumulateur à une électrode supercondensateur. Dans ces systèmes, l'utilisation d'une électrode de batterie qui stocke les charges dans le volume sous la forme de réactions électrochimiques permet d'améliorer la densité d'énergie. L'électrode de supercondensateur associée confère quant à elle la puissance au système. Les combinaisons les plus étudiés aujourd'hui associent une électrode de carbone activé à une électrode en oxyde métallique, et se répartissent en deux groupes : électrolyte aqueux et électrolyte organique.

Les hybrides carbone / MnO_2 en électrolyte aqueux [8,9] offrent l'avantage d'utiliser des matériaux non toxiques. L'électrode de MnO_2 fonctionne ici sur la base de réactions rédox de surface rapides ; on parle de comportement pseudo-capacitif. Malgré des performances en terme d'énergie et de puissance un peu en deçà de celles des supercondensateurs carbone / carbone symétriques, leur tensions de cellule élevée (2V en milieu aqueux) ainsi que leur stabilité en cyclage les rendent attractifs ; la société Ness commercialise ce type de supercondensateurs. Les travaux en cours sur ces systèmes cherchent notamment à augmenter la densité d'énergie des électrodes de MnO_2 en jouant sur la structure cristallographique ou encore sur la surface spécifique.

Parmi les hybrides fonctionnant en électrolyte aqueux, une autre approche consiste à coupler une électrode négative de carbone activé à une électrode positive d'accumulateur au plomb en PbO_2 , dans une solution d'acide sulfurique. L'avantage de cette technologie est de tirer profit du faible coût de l'oxyde de plomb et de l'acide sulfurique ; les densités d'énergie obtenues sur des cellules de laboratoire atteignent les 10 Wh/kg [10]. Des prototypes sont fabriqués dans plusieurs sociétés au Canada et aux USA (Axion Power International, American Electric Power, JME). Les travaux en cours sur cette technologie sont focalisés sur l'amélioration de l'électrode négative, plus particulièrement sur les problèmes de l'interface entre le collecteur de courant en plomb et le film de carbone activé.

Les systèmes en milieu organiques de type carbone / oxydes associent généralement une électrode de carbone activé à une électrode à insertion d'ions lithium. Cette approche a été initiée dès 1999 par Telcordia qui a mis au point des systèmes $Li_4Ti_5O_{12}$ /

charbon actif [11]. Suite aux remarquables résultats obtenus par ce groupe, de très nombreux travaux ont été développés depuis lors. Les prochaines années devraient voir l'émergence de nouvelles technologies sur ce type d'hybrides « supercondensateurs / Li-ion ».

5.2 Les carbones microporeux

Les systèmes hybrides sont développés pour améliorer la densité d'énergie des supercondensateurs. Une autre approche est développée par les laboratoires de recherche, en travaillant sur la synthèse de matériaux carbonés de capacité spécifique élevée.

Comme nous l'avons expliqué précédemment, les carbones activés utilisés classiquement dans les supercondensateurs sont des carbones mésoporeux de grande surface spécifique (1000 à 2000 m².g⁻¹). Ces matériaux possèdent une taille de pore comprise entre 2 et 20 nanomètres de façon à permettre aux ions solvatés d'accéder aux pores. Cette restriction quant à la structure des matériaux à utiliser a toujours limité la quantité d'énergie stockée dans les supercondensateurs.

De très récents résultats ont montré que, contrairement à ce qui était attendu, les pores d'un diamètre inférieur à 1 nm (micropores) participent activement au stockage des charges. Les ions solvatés d'un diamètre 1,2 nm sont ainsi capables de rentrer dans ces pores grâce à la déformation du cortège de solvatation qui entoure l'ion [4]. Grâce à la contribution de ces pores de petite taille, les carbones préparés à partir de carbures atteignent des performances en capacités massique et volumiques très supérieures à celles des charbons actifs standards (140 F.g⁻¹ et 84 F.cm⁻³ à comparer à 100 F.g⁻¹ et 45 F.cm⁻³ pour des charbons actifs). D'autres matériaux microporeux obtenus à partir de minerai charbon ont également donné des résultats intéressants [12]. Si les contraintes économiques le permettent, ces nouveaux matériaux microporeux devraient permettre d'augmenter la densité d'énergie des supercondensateurs de façon significative dans un futur proche ce qui étendra encore le champ d'application de ces systèmes.

Références

- [1] : B.E. Conway, *Electrochemical Capacitors*, Plenum Publishing, New York, 1999.
- [2] C. Portet, P. L. Taberna, P. Simon and C. Laberty-Robert, *Electro. Acta*, 49, Issue 6, March 2004, 905-912
- [3] C. Portet, P.L. Taberna, P. Simon and E. Flahaut, "Journal of the Electrochemical Society", 153 (4) A649-A653 (2006).
- [4] J. Chmiola, G. Yushin, Y. Gogotsi, C. Portet, P. Simon and P.L. Taberna, *Science*, 313, 1760-1763 (2006)
- [5] Cristelle Portet, Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse III, « Etude de Supercondensateurs carbone / carbone à collecteur de courant en aluminium », soutenue le 23/11/2005.
- [6] C. Vix Guterl et al., *Mater. Sc. Engineer. B*, 108 (2004) 148-155
- [7] P.L. Taberna, P. Simon, J.F. Fauvarque, *Journal of the Electrochemical Society*, 150 (3) A292-A300 (2003).
- [8] T. Brousse, M. Toupin and D. Bélanger, *J. Electrochem. Soc.* 151 (4) A614-A622 (2004)
- [9] V. Khomenko, E. Raymundo-Piñero and F. Béguin, *J. Power Sources*, (153) 2006 183-190
- [10] Wendy G. Pell and Brian E. Conway, *Journal of Power Sources*, Volume 136, Issue 2, 1 October 2004, Pages 334-345
- [11] A. Du Pasquier, A. Plitz, J. Gural, S. Menocal and G. Amatucci, *J. Power Sources* 113 (2003) 62-71
- [12] E. Raymundo-Piñero, K. Kierzek, J. Machnikowski and F. Béguin *Carbon* 44, (12) 2498-2507 (2006)

Eléments d'étude d'un système de stockage de l'énergie électrique : le supercondensateur

Emmanuel HOANG^o, Gilles FELD^o, Bertrand REVOL^o, Denis PENARD^o

^o Ecole Normale Supérieure de Cachan, département E.E.A.

^o Institut Universitaire de Technologie de Cachan

hoang@satie.ens-cachan.fr ; feld@eea.ens-cachan.fr ; revol@satie.ens-cachan.fr ; denis.penard@u-psud.fr

Résumé : Dans les véhicules où la traction est réalisée, ou aidée, par une motorisation électrique, apparaît un nouvel élément de stockage de l'énergie électrique : le supercondensateur (ultracapacitor). Dans cet article est présenté un convertisseur continu-continu qu'il est indispensable d'associer à ces supercondensateurs. Dans une première partie, une modélisation uniquement de ces derniers est proposée. Dans une deuxième partie, nous nous intéressons au dimensionnement des éléments du hacheur. Pour le contrôle des flux d'énergie et pour la commande rapprochée des transistors de puissance, nous utilisons un nouveau type de microcontrôleur : le PSOC. Nous présenterons dans la dernière partie les avantages de ce composant et ses possibilités.

1 Introduction

Dans un véhicule automobile à motorisation hybride (thermique – électrique), le stockage de l'énergie électrique peut être réalisé avec une batterie composée de 228 éléments Ni-MH (Nickel Métal Hydrure) connectés en série. La masse totale est de 52 kg. A pleine charge, la tension est de 300 V et la capacité est de 6,5 Ah. La résistance interne de la batterie a pour valeur $R_{int} = 0,46 \Omega$. La puissance maximale théorique que peut fournir la batterie est de 50 kW ($U_0/4 R_{int}^2$). S'il on considère le courant maximum à la décharge (80 A), la puissance maximale n'est plus que de 24 kW.

Avec 120 supercondensateurs (SC) de 350 F – 2,5 V connectés en série, la masse est de 7,2 kg et la puissance que l'on peut obtenir est de 28 kW (3,9 kW / kg). Par contre l'énergie stockée n'est que de 36 Wh (1950 Wh pour la batterie Ni-MH de 52 kg).

L'énergie nécessaire pour accélérer le véhicule, dont la masse est de 1400 kg, de 0 à 100 km/h est de 150 Wh. Cette valeur est de 38 Wh, pour passer de 0 à 50 km/h.

2 Constitution

D'après [3] : Le stockage de l'énergie électrique dans les supercondensateurs se fait sous forme électrostatique, au travers d'une accumulation de charges ioniques dans d'interface électrode/électrolyte. Cela donne des potentialités remarquables comparativement aux batteries ou aux condensateurs.

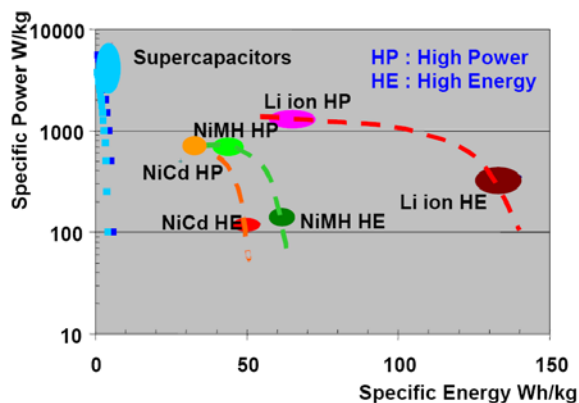


Figure. 1 : Diagramme de Ragon

3 Eléments de modélisation

Afin de nous "familiariser" avec ces "nouveaux" éléments, nous avons entrepris des études simples à mettre en œuvre avec le matériel disponible dans le laboratoire.

Pour notre étude, nous avons utilisé des supercondensateurs de 350 F – 2,5 V de chez Maxwell Technologies SA [5]. La masse d'un élément est de 60 g et son prix est d'une dizaine d'euros. Nous les avons connectés en série par groupe de six et toutes les connexions sont accessibles pour une analyse du comportement de chaque élément.



Figure. 2 : Disposition des six supercondensateurs.

3.1 Capacité de stockage

Dans un premier temps, nous avons étudié le comportement "statique" des SC. Pour cela, à l'aide d'une alimentation stabilisée, nous avons effectué une charge à courant constant (voir fig. 3) de 12 SC de valeur 350 Farad chacun connectés en série et nous avons déterminé l'énergie stockée par intégration de la puissance instantanée. Calcul de la capacité équivalente avec :

$$W = \frac{1}{2} C_{eq} V^2$$

A la tension maximale de 30 V (12 x 2,5 V), l'énergie stockée est de 12,8 kJ soit 3,5 Wh.

Pour 12 supercondensateurs, la valeur de la capacité varie de 22 Farad, sous une tension de 10 V, à 30 Farad,

sous 30 V(voir fig. 4). Nous avons déterminé une dispersion de $\pm 7 \%$ des capacités, en mesurant la tension aux bornes de chacun des douze éléments mis en série. Il faut noter que dans notre cas, étant donné que tous les SC sont en série, la dispersion des valeurs des capacités ne pose pas de problème, car elle se traduit par des disparités sur les tensions mais dans des proportions acceptables. Dans le cas d'une mise en parallèle des SC, cela se traduit par des disparités en courant qui peuvent être pénalisantes.

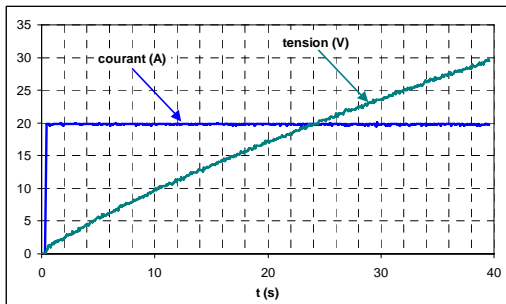


Figure 3 : Charge à courant constant

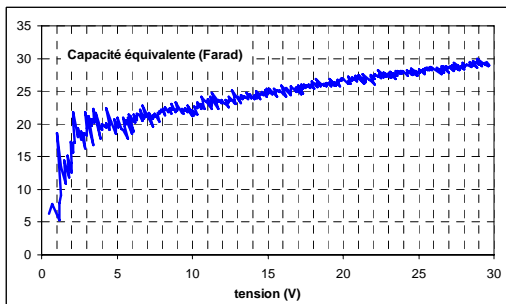


Figure 4 : Détermination de la capacité équivalente

3.2 Décharge dynamique

Le deuxième point étudié est le calcul de l'énergie qu'il est possible de récupérer en fonction de la puissance demandée. Pour faire ce calcul les équations nécessaires sont :

$$v_{SC} = \frac{1}{C_{SC}} \int i_{SC} dt + ESR_{SC} i_{SC}$$

$$i_{SC} \text{ tel que : } p_{SC} = v_{SC} i_{SC} = p_0 \text{ et } p_0 < 0$$

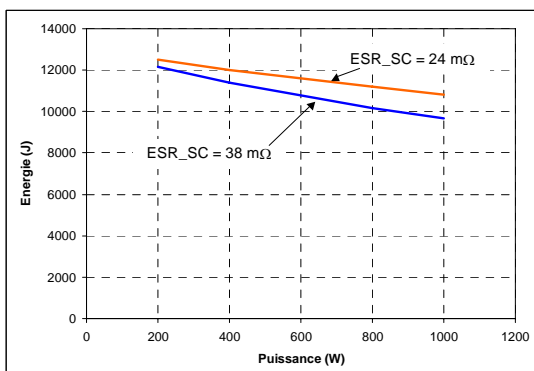


Figure 5: Capacité énergétique en fonction de la puissance demandée pour deux valeurs de la résistance série.

R_q : La résolution de ces équations demande une méthode numérique.

On peut voir que la prise en compte des différents éléments dissipatifs va être déterminante sur la capacité de décharge dynamique des supercondensateurs.

3.3 Modèle dynamique

Afin de déterminer un modèle dynamique de l'ensemble des SC en série, en vu de leurs associations avec un convertisseur, des impulsions de courants sont injectées à l'aide d'un hacheur (cellule de commutation bi-directionnelle en courant) associé à un correcteur à hystérésis. La tension du bus DC est ajustée à 50 V avec une alimentation stabilisée. Une inductance de lissage est mise en série avec les SC. Deux essais ont été effectués avec une tension du bus DC de 50 V. Le premier à ondulation du courant "minimale" et à "forte" inductance (fig. 6), le second à ondulation "maximale" et à "faible" inductance (fig. 7).

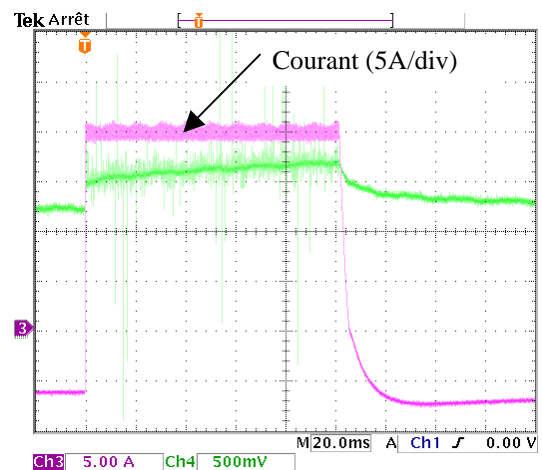


Figure 6 : $L = 0,5 \text{ mH}$, $I = 20 \text{ A}$, Ch3 :courant, Ch4 : tension

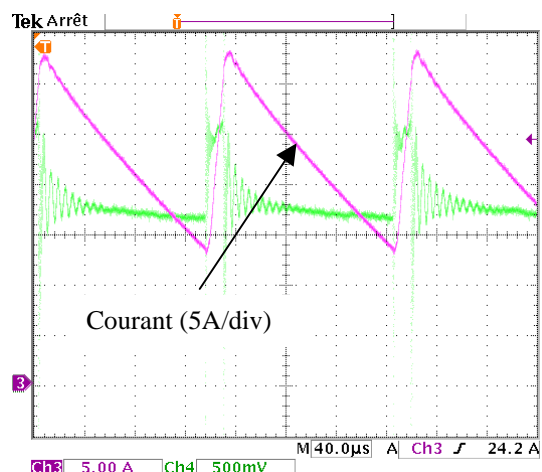


Figure 7 : $L = 30 \mu\text{H}$, $I = 20 \text{ A}$, Ch3 :courant, Ch4 : tension

Le modèle de l'ensemble des supercondensateurs (SC) est équivalent à la mise en série d'un condensateur (C_{SC}), d'une résistance (ESR_{SC}) et d'une inductance (I_{SC}). pour 6 SC : $C_{SC} = 60 \text{ F}$; $ESR_{SC} = 12 \text{ m}\Omega$; $I_{SC} = 0,5 \mu\text{H}$.

Rq : La valeur de la résistance série (ESR_{SC}) peut être obtenue à l'aide de la documentation technique du fabriquant.

4 Convertisseur associé

4.1 Rôle du convertisseur

L'énergie stockée dans les supercondensateurs est fournie (ou récupérée) à une source de tension continue, généralement un bus de tension DC, sur lequel est connecté des charges (hacheur + mcc ou onduleur + MS ou MAS). Cette tension est maintenue constante pour un "bon" fonctionnement des charges. La variation d'énergie des SC se traduit par une variation de tension à leurs bornes. La variation d'énergie s'exprime par :

$$\Delta W = \frac{1}{2} C_{SC} (V_{max}^2 - V_{min}^2)$$

S'il on veut extraire 90 % de l'énergie maximale stockée, il faut que :

$$V_{min} = \frac{1}{3} V_{max}$$

Cette variation de tension nécessite d'intercaler un convertisseur DC-DC entre le bus DC et les SC.

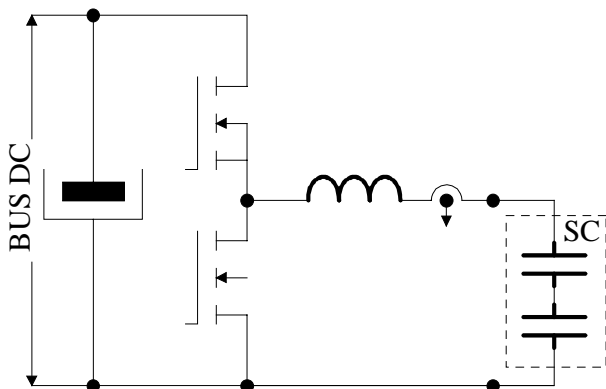


Figure 8 : Convertisseur DC-DC associé aux SC

Cette structure de convertisseur, qui est la "plus instinctive", car les SC sont placés du côté "basse" tension, est cependant porteuse de contraintes contradictoires. En effet, l'utilisation "optimale" des SC nécessite des pointes de courant, qu'ils doivent accepter thermiquement, mais qui sont néfastes pour le dimensionnement de l'inductance de lissage et pour le ou les condensateurs du bus DC.

Ces deux éléments sont des contraintes fortes à prendre en compte lors du dimensionnement des éléments du convertisseur.

4.2 Dimensionnement des éléments

Pour l'étude des supercondensateurs, il est indispensable de leurs associer un convertisseur. Du dimensionnement de celui-ci dépendra, finalement, les performances des SC, car on considère souvent et peut être à tort les convertisseurs comme idéaux et non porteurs de paramètres pou

vant influencer le comportement global d'un système de conversion d'énergie.

Pour le dimensionnement des éléments, les contraintes sont les pertes directes ou indirectes associées, les échauffements et les volumes.

Nous nous sommes imposés que le volume du convertisseur soit du même ordre (ou moindre si possible) que celui des supercondensateurs.

Nous avons dégagé un élément de dimensionnement critique qui est le courant maximal que l'on est capable de commuter. Cette valeur, qui tient plus du savoir faire, détermine la valeur de la puissance maximale au point le plus défavorable, c'est à dire quand la tension aux bornes des SC est égale à V_{min} . Dans le cas de décharge à puissance constante : $P_{max} = V_{min} I_{SC_max}$.

Nous nous sommes limités à une valeur de ± 100 A, ce qui donne pour 12 SC : $V_{min} = 10$ V ; $P_{max} = 1$ kW.

Mais pour le test de la décharge à puissance constante (voir fig. 5), la valeur du courant maximal vient encore dégrader la capacité de décharge dynamique, cette fois ci de l'ensemble SC - convertisseur.

En effet avec :

$$\Delta W = \frac{1}{2} C_{SC} (V_{max}^2 - V_{min}^2)$$

Et $P_{max} = V_{min} I_{SC_max}$

$$\Rightarrow \Delta W = \frac{1}{2} C_{SC} \left(V_{max}^2 - \left(\frac{P_{max}}{I_{SC_max}} \right)^2 \right)$$



Figure 9 : Vue d'ensemble du hacheur, de l'inductance de "lissage" et des deux boîtes de six supercondensateurs.

Pour les pertes indirectes, l'élément principal est l'ondulation de courant dû au mode d'alimentation.

L'asservissement de courant se faisant à l'aide d'un correcteur à hystérésis, c'est l'ondulation de courant qui est fixée.

Pour le calcul des pertes Joule, le courant efficace dans les SC est donné par :

$$I_{SC_eff}^2 = I_{SC}^2 + \frac{\Delta I^2}{12}$$

I_{SC} étant le courant "moyen" dans les SC.
le courant efficace dans les condensateurs du bus DC :

$$I_{C_DC_eff}^2 = \alpha(1-\alpha)I_{SC}^2 + \alpha \frac{\Delta I^2}{12}$$

avec $\alpha = \frac{V_{SC}}{V_{DC}}$

V_{SC} = tension aux bornes des SC

V_{DC} = tension du bus DC

Pour le calcul des pertes de conduction dans les transistors, c'est le même courant que dans les SC et pour les pertes de commutation, nous avons :

$$P_{com} = 2 \frac{1}{2} V_{DC} I_{SC} (t_r + t_f) f_d$$

$$f_d = \frac{\frac{V_{SC}}{V_{DC}} \left(1 - \frac{V_{SC}}{V_{DC}}\right) V_{DC}}{L \Delta I}$$

Application numérique :

- Condensateur du bus DC : 4700 μ F / 63 V (2 en //)
ESR par condensateur du bus DC = 50 m Ω
- Transistor MOSFET 180NE10
 $R_{DSON} = 4,5$ m Ω
 $t_r + t_f = 600$ ns
- Super condensateur de 350 Farad (12 en série)
ESR par SC = 3,2 m Ω
- Inductance de lissage : $L = 30$ μ H ; $R_L = 15$ m Ω



Figure 10 : Vue de l'inductance de "lissage"

Pour l'inductance, nous avons utilisé un tore de diamètre extérieur de 57,2 mm, de diamètre intérieur de 35,6 mm et de hauteur 14 mm. Le matériau utilisé est du MPP 55107, la perméance est de 200 nH et l'induction à saturation est de 750 mT. Le nombre de spire est de 12, ce qui permet d'avoir un courant de saturation magnétique de l'ordre de 60 A.

Le choix de l'inductance a été fait en fonction de son volume et des répercussions sur la fréquence de découpage.

Le choix de l'ondulation de courant s'est fait en fonction des répercussions sur les pertes supplémentaires et surtout en fonction de l'électronique de commande. En effet, nous avons utilisé une sonde de courant LEM LAS_50-TP. Cette sonde de courant, alimentée en 5 V, permet de mesurer des courants de ± 150 A. Avec un hystérésis électronique de 200 mV, cela se traduit par une ondulation de courant de 12 A. Compte tenu du "bruit" électronique, l'ondulation de courant a été ajustée à ± 20 A.

4.3 Résultats expérimentaux

Afin de tester le hacheur et la boucle d'asservissement de courant, nous imposons des impulsions de courant en consigne. Afin que l'alimentation du côté bus DC puisse fournir les pointes de courant, nous lui avons placé en parallèle 24 supercondensateurs de 350 Farad en série. Du côté de la charge, ce sont 12 supercondensateurs de 2600 F qui sont placés en série (voir Fig. 17). Les essais présentés à la figure suivante ont été réalisés avec un bus DC à 60 V et avec une consigne de courant à 80 A.

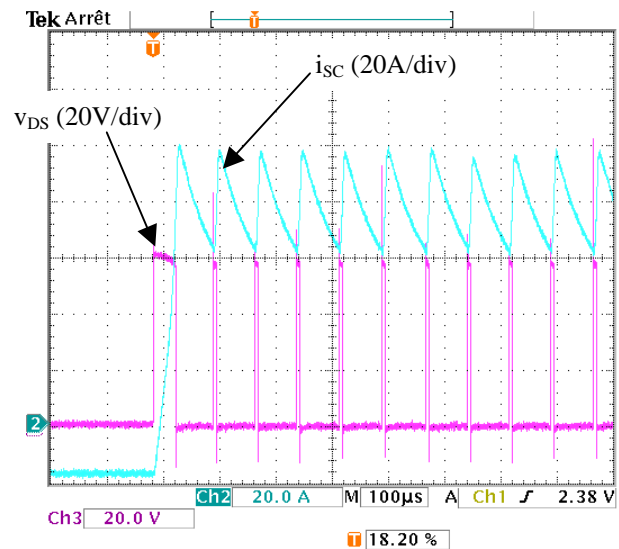


Figure 12 : essai de la boucle de courant. Courant dans les SC (i_{sc}) et tension drain source aux bornes du transistor du "bas" (v_{DS}).

En couplant les caractéristiques thermiques avec les simulations temporelles, il est possible de calculer les échauffements en fonction par exemple, de la valeur de l'inductance de lissage ou de la valeur de l'ondulation de courant. Les caractéristiques thermiques des différents éléments sont :

Par élément	R_{th}	C_{th}
Condensateur du bus DC	20 °C/W	45 J/°C
Super Condensateur	10 °C/W	75 J/°C
Dissipateur thermique	0,65 °C/W	300 J/°C

Le schéma de modélisation est donné en annexe.

5 Bilan énergétique

L'épreuve de "vérité" est finalement la capacité énergétique dynamique de l'ensemble constitué des supercondensateurs ET du hacheur.

Test de décharge sous 40 V côté bus DC et $V_{SC0} = 30$ V.

- Pour 104 W, pendant 50,8 s \Rightarrow 9347 J
- Pour 400 W, pendant 21,2 s \Rightarrow 8480 J
- Pour 800 W, pendant 7,44 s \Rightarrow 5952 J

Sur les deux figures suivantes, sont présentées la tension du bus DC (Ch2), le courant dans les SC (Ch4) et la tension aux bornes des SC (Ch3).

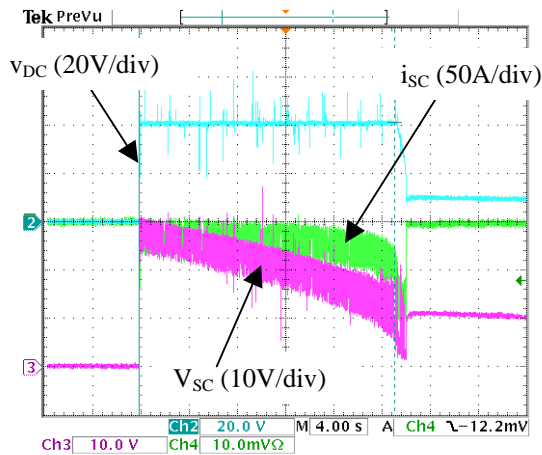


Figure 13 : Test de décharge sous 10 A du côté de bus DC

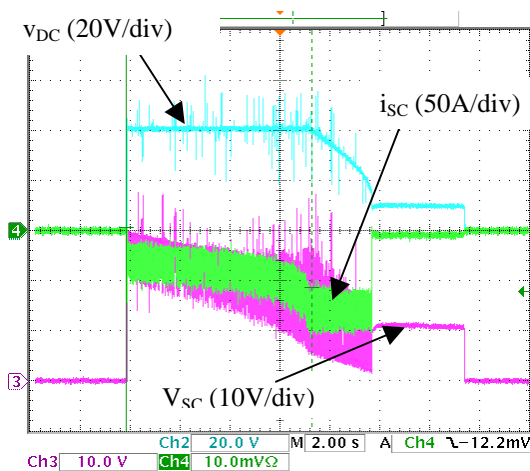


Figure 14 : Test de décharge sous 20 A du côté de bus DC

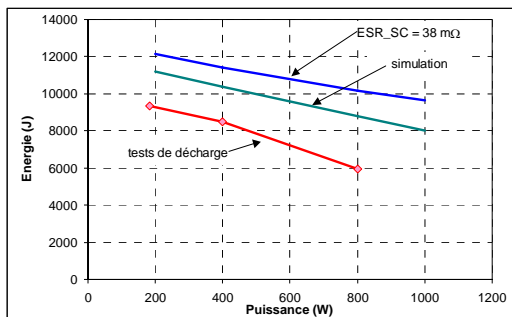


Figure 15 : Tests de décharge dynamique

6 Application(s)

6.1 Récupération d'énergie au freinage d'un véhicule hybride

Dans [8], les auteurs présentent un système de stockage d'énergie pour la récupération de l'énergie cinétique d'un véhicule de 1500 kg se déplaçant à 60 km/h.

Ce système de stockage utilise 27 supercondensateurs de 2700 F chacun. La tension maximale aux bornes des SC est de 56 V et le courant est limité à 400 A.

Au moment du freinage, la tension initiale des SC est de 28 V, ce qui permet d'absorber une puissance maximale de 11,2 kW et l'énergie récupérable est de 117 kJ.

Les auteurs ont, en outre, mesuré le rendement du système de récupération et les énergies perdues sur un cycle de charge/décharge en fonction de la puissance instantanée et du niveau de tension du bus DC. L'ordre de grandeur du rendement énergétique se situe entre 50 et 75 %.

6.2 Monte charge

Soit une masse de 20 kg, que l'on déplace verticalement sur une distance de 1 m à la vitesse de 1,5 m/s.

L'accélération est de $7,5 \text{ m/s}^2$. Les phases d'accélération et de freinage durent 200 ms, la phase à vitesse constante 500 ms. La puissance maximale est de 525 W et l'énergie nécessaire au déplacement, sans tenir compte des pertes, est de 210 J. Il faut noter que cette énergie doit être fournie à la masse lors d'une montée, mais est entièrement récupérable lors d'une descente.

Pour ce système, si l'on considère les pertes négligeables, dix SC de 10 F – 2,5 V en série peuvent suffire.

Compte tenu de la difficulté d'associer en parallèle deux source de tension, nous envisageons que le bus DC (de 48 V par ex.) soit alimenté par les SC associés à leur convertisseur DC/DC présenté dans la partie 4 et que l'alimentation depuis le réseau d'énergie se fasse via un redresseur à diode et un hacheur abaisseur régulé en courant directement au niveau des SC. Cette alimentation, est dimensionnée en puissance uniquement pour fournir les pertes du système complet.

6.3 Scooter électrique

Dans [9], les auteurs présentent un ensemble novateur hacheur – supercondensateurs ayant pour but de soulager la batterie, lors des phases transitoires, pour une motorisation de scooter électrique.

La batterie NiCd, composée de trois éléments de 6 V – 100 Ah, peut être amenée à fournir jusqu'à 3500 W lors des phases d'accélération. Grâce à l'assistance énergétique (SC) la puissance maximale fournie par la batterie est limitée à 1200 W, ce qui a pour conséquence d'augmenter la durée de vie de cette dernière.

Les auteurs présentent une structure et la commande associée de convertisseurs dc-dc entrelacés permettant de minimiser le volume des inductances ainsi que les pertes.

6.4 Tramway

Dans [1], les auteurs envisagent une alimentation de tramway par « biberonnage » nécessitant un double stockage. Des batteries de supercondensateurs installées dans des stations fixes reçoivent de l'énergie du réseau et permettent au passage de la rame de recharger les réservoirs d'énergie installés dans le véhicule sur un temps limité (inférieur à 20 s). Dans cette application, il est nécessaire d'installer environ 2400 supercondensateurs (1800 F_ 2,5 V) dans le véhicule et autant dans chaque station. Le nombre de supercondensateurs élevé conduirait aujourd'hui à un coût prohibitif.

Une autre application [1] possible dans les transports terrestres est la compensation des chutes de tension en des points sensibles du réseau. Sur l'exemple considéré, l'installation en bout de ligne de 6480 supercondensateurs (1800 F_ 2,5 V) représentant un volume de 1,9 m³ et une masse de 2,5 t permettrait de limiter la chute de tension à 10 % alors qu'elle peut atteindre aujourd'hui 50 % lors du démarrage simultané de trois rames.

Une dernière application proposée [10] est l'assistance énergétique pour une locomotive diesel-électrique. Sur certains parcours à faible potentiel de trafic, l'électrification des lignes ne se justifie pas. L'utilisation dans ces conditions de locomotives diesel-électrique ne disposant pas de moyen de stockage réversible est pénalisant sur la consommation surtout sur des trajets en région montagneuse. Sur un parcours type, l'utilisation de 15000 éléments de 2600 F permettrait de réduire la puissance du moteur thermique dans un rapport de deux. Le gain en consommation serait de 50 % et ceci sans perte de performance. Le seuil de rentabilité serait franchi au bout de dix années.

7 Electronique de commande

La première version de l'électronique de commande est entièrement analogique (à l'ancienne). La boucle de courant est réalisée avec un correcteur à hystérésis (LM311) et la boucle de tension avec un correcteur PI (AOP TS921, qui a la particularité d'être "rail to rail"). Les temps morts de commutation (2 µs) sont réalisés avec des circuits R-C-D et la commande rapprochée des transistors utilise des opto-coupleurs TLP 250 alimentés par des convertisseurs DC-DC isolés 5V / 15 V / 1 W. Pour finir, nous avons utilisé un convertisseur DC-DC 18-72 V / 5 V / 6 W pour l'alimentation de la partie électronique, la prise d'énergie étant faite à la fois au niveau des SC que du bus DC (OU à diodes) et la plage d'entrée de la tension 18-72 V permet de s'adapter à un grand nombre de configurations.

La "simplicité" de cette réalisation a une certaine limitation. La principale est, nous semble-t-il, l'hystérésis "importante" qu'il est nécessaire d'introduire compte tenu du "bruit" électronique.

Il serait intéressant de réaliser une correction analogique avec correcteur de type PI et M.L.I. à 15-20 kHz.

Il serait encore plus intéressant de réaliser cette modification en intégrant toute la partie électronique à l'aide d'un nouveau type de micro-contrôleur : le PSoC. Deux réalisations de hacheurs fonctionnent avec des PSoC et sont contrôlés par un bus de terrain I2C en temps réel (consigne courant, tension bus DC, gains des correcteurs).

Nous tenons à remercier messieurs Jean Marie Désagulier et David Du pour leurs savoirs faire quant à la réalisation des différents montages d'électronique de puissance et d'électrotechnique.

8 Conclusion

Nous avons présenté, dans cet article, un élément de stockage de l'énergie électrique adapté aux systèmes électriques où les régimes de fonctionnement transitoires occupent une place importante dans les cycles de fonctionnement. Cet élément, le, ou plutôt, les supercondensateurs est idéal pour fournir ou stocker l'énergie cinétique et potentielle des systèmes mécaniques. Nous avons présenté quelques exemples d'application afin de fournir des grandeurs numériques sur les énergies stockables et les puissances mises en jeu. Cependant, il est indispensable d'associer à ces supercondensateurs un convertisseur statique pour compenser les inévitables variations de tensions aux bornes de ces derniers. Généralement, la demande de puissance maximale se fait lorsque les supercondensateurs sont à leur niveau de charge le plus défavorable, ce qui signifie qu'il faut être capable de commuter des courants formidables et finalement, la difficulté de la mise en œuvre de ces supercondensateurs est plus un problème de dimensionnement et de conception de convertisseur statique DC-DC. Il nous semble, aussi, important d'étudier et de connaître la thermique des supercondensateurs afin de déterminer au mieux le courant limite (amplitude et durée) car c'est ce dernier qui va borner la puissance convertible du système de stockage.

9 Bibliographie

- [1] Dr. P. Barrade, D. Hotellier, Prof. A. Rufer
Apport des supercondensateurs dans le transport terrestre : une meilleure gestion de l'énergie
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
(<http://leiwwww.epfl.ch> ; <http://www.epfl.ch>)
- [2] Bernard Multon, Jacques Ruer
Stocker l'énergie : oui, c'est indispensable et c'est possible. ! Pourquoi ? Où ? Comment ?
Publication du club ECRIN : www.ecrin.asso.fr
- [3] Ph. Desprez, G. Barrailh, P. Lavaur, M. Bariand, C. Jehoulet (SAFT), S. Raël, B. Davat (INPL / GREEN)
SAFT Supercapacitors cells and batteries
Congrès EPE 2003 - Toulouse
- [4] M.Y. Ayad, S. Raël, B. Davat

Hybrid power source using supercapacitors and batteries. Congrès EPE 2003 – Toulouse

[5] A. Schneuwly, G. Sartorelli, J. Auer, B. Maher
Ultracapacitors revolutionize the power electronic world
 Maxwell Technologies SA, www.maxwell.com

[6] Hamid Gualous, Rolland Gallay, Alain Berthon
Utilisation des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée : applications transport.
 Revue REE, n°8, pp 83-90, septembre 2004.

[7] J. F. Fauvarque, A. Laforgue, C. Sarrazin, P. Simon
Supercondensateurs hybrides. Perspectives d'application aux véhicules.
 Revue REE, n°10, pp 29-33, novembre 2004.

[8] Z. Cerovský, P Mindl

Regenerative braking by electric hybrid vehicles using super capacitor and power splitting generator
 Congrès EPE 2005 – Dresden, Germany.

[9] B. Destraz, P. Barrade and A. Rufer
A new solution for increasing the efficiency of an electric scooter with supercapacitors through a novel interleaved multi-channel dc/dc converter
 Congrès Electromotion 2005 – Lausanne, Suisse.

[10] : B.Destraz
Assistance énergétique pour une locomotive diesel-électrique avec un stockage supercapacitif
 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
<http://www.epfl.ch>

10 Annexe

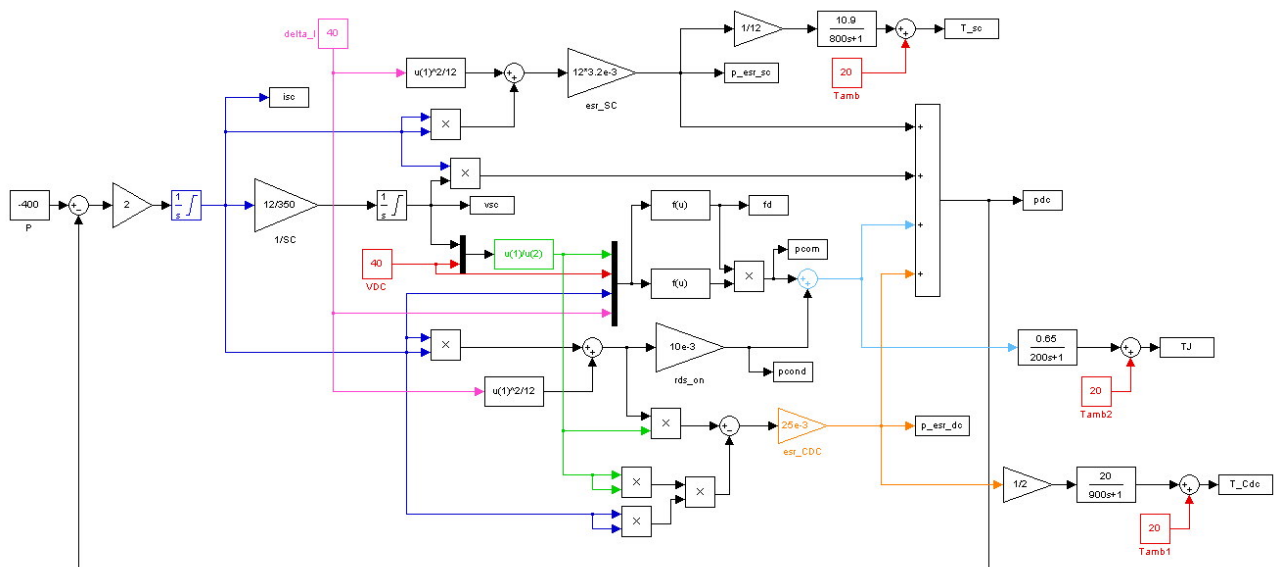


Figure 16 : schéma de modélisation pour l'étude des cycles de fonctionnement.

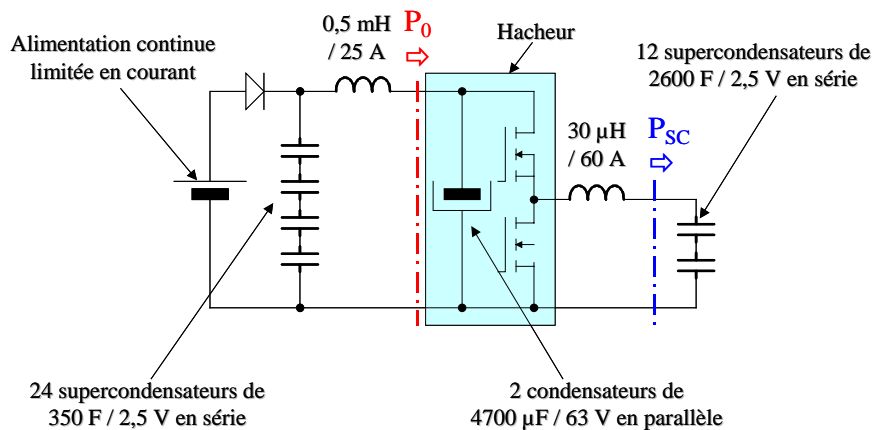


Figure 17 : schéma du montage pour l'étude des cycles de fonctionnement.

Réalisation et essais d'un SMES haut T_c de 800 kJ

P. TIXADOR, B. BELLIN, M. DELEGLISE^{*}, J.C. VALLIER^{*}, A. ALLAIS^{}, M. AMIET^{***}**

CNRS-Institut Néel, G2Elab, bât. E, B.P. 166, 38 042 Grenoble Cedex 09

^{*}CNRS-Institut Néel, B.P. 166, 38 042 Grenoble Cedex 09

^{**}Nexans France, 4-10, rue Mozart, 92 587 Clichy Cedex

^{***}DGA/DET/CEP, Tour DGA, 5 bis avenue de la Porte de Sèvres, 00 457 Armées

Résumé : Le SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) est l'un des rares moyens de stockage électrique grâce à l'énergie magnétique dans une bobine supraconductrice court-circuitée. La puissance volumique peut être extrêmement forte (100 MW/kg) ce qui en fait un candidat très intéressant pour des sources impulsives de puissance dans les domaines militaires ou civils. Les supraconducteurs à haute température critique sont particulièrement bien adaptés aux SMES impulsifs. La première génération de conducteur "haut T_c " (rubans OPIT (Oxide Powder In Tube)) est disponible en longueurs kilométriques et la deuxième génération se développe rapidement. En collaboration avec NEXANS, nous avons étudié et réalisé un SMES de 800 kJ, dans le cadre d'un contrat entre NEXANS et la DGA (Délégation Générale pour l'Armement). Le conducteur pour l'enroulement supraconducteur utilise 3 ou 4 rubans PIT BiSrCaCuO de NEXANS soudés en parallèle puis isolés par un ruban Kapton[®]. Le nombre de rubans dépend de l'induction magnétique. Le conducteur est renforcé par un ruban en acier inoxydable aux endroits où les contraintes mécaniques sont maximales. La bobine est constituée d'un empilage de 26 galettes bobinées et collées sur des disques de cuivre recouverts d'époxy. Le diamètre extérieur de la bobine est de 814 mm et sa hauteur de 220 mm. Le refroidissement à environ 20 K est assuré uniquement par conduction à partir de l'étage froid de cryo-réfrigérateurs pour une cryogénie intégrée et transparente pour l'utilisateur. La cryogénie fonctionne très bien, en accord avec le dimensionnement thermique. Des essais partiels du SMES ont été aussi réussis avec des décharges conformes aux calculs et des pertes faibles tandis que le courant assigné a été atteint.

1. Introduction

L'absence de résistivité des supraconducteurs permet de stocker de l'énergie dans une bobine supraconductrice court-circuitée. File et Miles ont mesuré une constante de temps (L/R , L : inductance ; R : résistance) dépassant 144 000 années [1] pour une bobine supraconductrice soigneusement court-circuitée. Ce dispositif est connu sous son acronyme anglais SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage. Le SMES est l'un des rares moyens de stockage direct de l'énergie électrique. Les premières idées sur le SMES sont apparues en France dans les années 60 par M. Ferrier [2]. L'application visée initialement était de couvrir les pointes de consommation électrique dans les réseaux, mais celle-ci se heurte au gigantisme des bobines nécessaires pour stocker suffisamment d'énergie. Les autres applications des SMES sont multiples et beaucoup plus réalistes [3] :

- alimentations ininterrompibles (« UPS »),
- sources impulsives,
- FACTS (Flexible AC Transmission Systems) particuliers.

Les SMES comme FACTS peuvent en effet fournir ou absorber des puissances actives ou réactives au réseau avec des temps de réponse extrêmement courts. Ils

contribuent ainsi à un meilleur fonctionnement : stabilisation ou réglage de tension, améliorant aussi la qualité de l'énergie. Plusieurs SMES ont par exemple très nettement corrigé un problème de chute importante de tension dans un réseau nord américain, dans le Wisconsin. Le SMES comme FACTS a été la première application de la supraconductivité dans un réseau électrique [4].

Nous allons nous intéresser plus particulièrement aux SMES utilisés comme sources impulsives d'énergie électrique. La demande est forte en physique fondamentale, armes électriques, lanceur électromagnétique, formage magnétique, ... Des solutions conventionnelles existent, en particulier les capacités, mais elles conduisent à des poids et volumes beaucoup trop importants pour plusieurs applications. Les volants d'inertie présentent d'excellentes performances, mais posent des problèmes de sécurité entre autres. Les SMES offrent une voie particulièrement intéressante.

La figure 1 illustre le fonctionnement d'un SMES comme source impulsive. Le SMES est tout d'abord chargé par une alimentation primaire (phase de charge ①), l'interrupteur étant ouvert. Quand le courant souhaité pour le SMES est atteint, l'interrupteur est fermé, court-circuitant la bobine (phase de stockage ②). La source primaire est alors débranchée. En ouvrant l'interrupteur, la bobine se

décharge et transfère son énergie à la charge (phase de décharge ③).

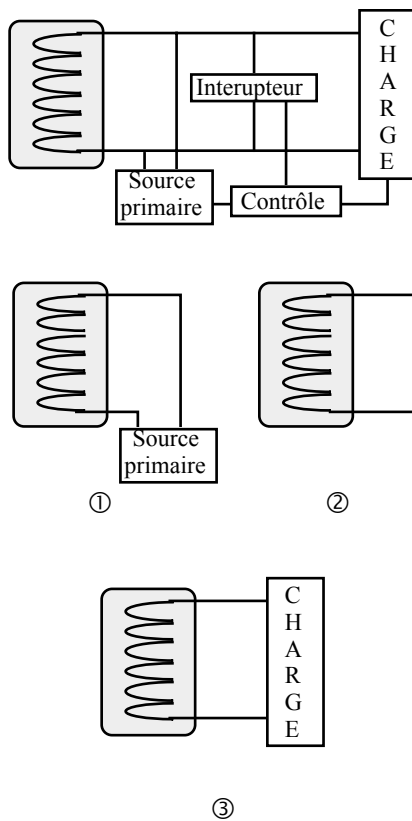


Figure 1 : SMES comme source impulsionnelle avec les trois phases de fonctionnement.

2. Performances et limites des SMES

La figure 2 donne quelques comparaisons des SMES avec les accumulateurs et les capacités en termes de puissance et d'énergie spécifiques. Les SMES associent une excellente puissance massique à une bonne énergie massique. La zone grise des SMES correspond aux valeurs actuelles obtenues. La zone noire indique les valeurs théoriquement possibles.

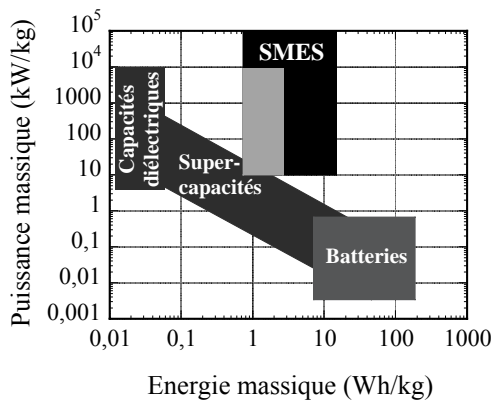


Figure 2 : Energie et puissance massique des SMES, des batteries et des capacités.

La densité massique d'énergie est principalement limitée par la structure mécanique. Le théorème du

Viriel [5] donne la masse minimale de la structure travaillant en traction pour résister aux forces électromagnétiques. Pour un solénoïde d'énergie magnétique stockée W_{mag} , l'expression est :

$$M_{min} = \frac{d}{\sigma} W_{mag}$$

où d la densité volumique du matériau et σ sa contrainte admissible.

Cette expression indique que la mécanique joue un rôle fondamental dans les SMES. Les propriétés mécaniques du conducteur supraconducteur sont donc essentielles pour cette application. Une énergie spécifique typique de 3,5 Wh/kg (12,5 kJ/kg) est basée sur une contrainte admissible de 100 MPa. Ces valeurs sont obtenues dans les plus grands aimants supraconducteurs actuels. L'aimant CMS [6] a une des valeurs records avec 11 kJ/kg (2,67 GJ et 225 tonnes froides). Avec des contraintes admissibles de 500 MPa, l'énergie spécifique grimpe à 17,5 Wh/kg, mais on voit que l'énergie massique restera toujours limitée par la mécanique. Les valeurs sont néanmoins au-delà des valeurs des capacités. La puissance massique présente par contre des valeurs beaucoup plus fortes sans réelle limite, d'où le fort intérêt des SMES comme source impulsionnelle.

La puissance est donnée par le produit de la tension par le courant. Une excellente isolation électrique et des courants élevés sont nécessaires pour obtenir de fortes puissances. La puissance est d'autant plus grande que l'énergie est transférée rapidement via une tension importante. Certaines pertes AC dans les conducteurs supraconducteurs, notamment les pertes par couplage, et les pertes par courants de Foucault dans le cryostat conduisent à des énergies dissipées inversement proportionnelles au temps de décharge en négligeant l'effet de peau. Ces pertes doivent être minimisées pour les SMES impulsionnels à décharges très rapides. Enfin, si des décharges ultra-rapides sont envisagées, les capacités séries et dérivées de l'enroulement prennent de l'importance. Sa conception doit en tenir compte pour éviter de fortes surtensions, comme dans un transformateur soumis à un front raide (foudre par exemple).

Si les puissances et énergies massiques restent des paramètres fondamentaux, d'autres caractéristiques doivent être étudiées avec attention.

Le rendement de conversion n'est pas le paramètre déterminant, mais il est avantageusement élevé surtout pour des applications répétitives. Les rendements de conversion des SMES sont excellents, ils peuvent atteindre 97 % dans certaines conditions.

Des éléments comme le temps de charge, la durée entre une décharge et une recharge sont très importants. La rapidité de la charge d'un SMES est limitée par la puissance de refroidissement et l'échauffement lié aux pertes dans la bobine ainsi que son environnement proche. L'échauffement est délicat lors de la charge car il est maximum lorsque le SMES fonctionne le plus proche de ses limites, quand la marge en température est minimale. Ce sont également ces pertes et la

puissance froide qui fixent la durée minimale entre une décharge et une recharge. Les pertes totales doivent être minimisées. Le nombre de cycles charge-décharge n'est pas limité par contre.

Sans aucune pièce en mouvement, sauf dans le système de refroidissement, le SMES est un dispositif très fiable d'autant que l'électronique associée est très simple même si les commutateurs doivent être très performants en termes de rapidité et de tenue en tension.

En résumé, les SMES présentent de nombreux avantages techniques, mais exigent des supraconducteurs et donc un environnement cryogénique pour fonctionner.

3. Cryogénie et matériaux haut T_c

Jusqu'à présent la plupart des SMES utilisent des supraconducteurs conventionnels, principalement du NbTi et fonctionnent à très basse température, en dessous de 5 K. La première génération de conducteur supraconducteur à haute température critique est disponible en longueurs kilométriques. Il est donc maintenant possible de réaliser des SMES « haut T_c ». Les références [7] et [8] donnent quelques exemples.

Intérêt d'augmenter la température de fonctionnement

Une température de fonctionnement « élevée » simplifie la cryogénie, diminue le coût cryogénique d'investissement et améliore la stabilité de la bobine. La figure 3 montre la décroissance importante du coût cryogénique lorsque la température augmente. C'est simplement la formule de Carnot ($T_a - T_f / T_f$) qui donne la puissance minimale à fournir à température ambiante (T_a) pour extraire des pertes à la température froide (T_f) dans le cas d'un cycle thermodynamique idéal réversible. L'irréversibilité joue sur l'amplitude mais pas sur l'évolution du coût cryogénique en fonction de la température.

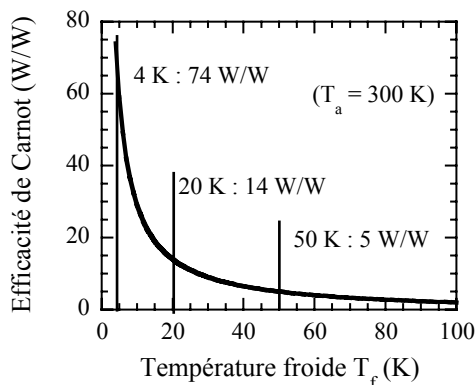


Figure 3 : Coût cryogénique en fonction de la température froide.

La figure 4 exprime un peu différemment l'intérêt de fonctionner à plus haute température en donnant la puissance froide disponible en fonction de la température pour une puissance absorbée par le cryo-

réfrigérateur donnée. Cette courbe montre que les marges en température peuvent plus élevées quand la température croît.

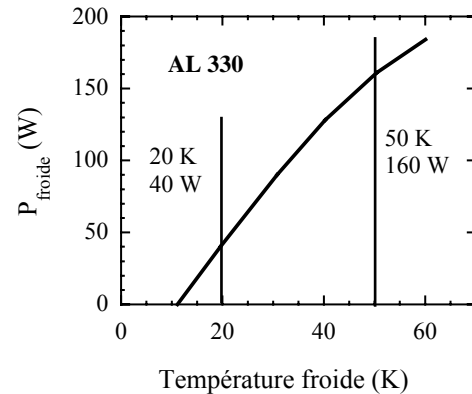


Figure 4 : Puissances froides disponibles en fonction de la température d'un cryo-réfrigérateur.

La figure 5 montre que la chaleur spécifique augmente très nettement quand la température croît. La chaleur spécifique d'un matériau est son frein interne contre les élévations de température. Les augmentations de température liées aux pertes par exemple sont nettement plus faibles avec des supraconducteurs à haute température critique. Le SMES est beaucoup plus stable vis-à-vis des perturbations extérieures.

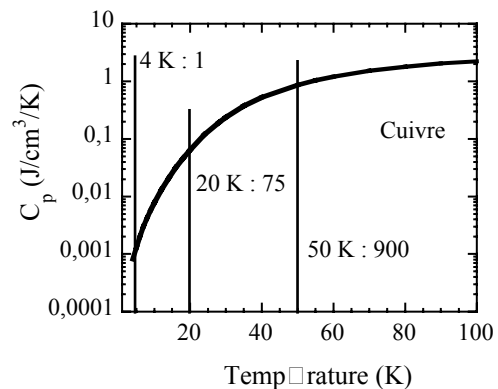


Figure 5 : Chaleur spécifique du cuivre en fonction de la température.

Des températures au-dessus de 20 K peuvent être assez facilement maintenues et à un coût modéré via des cryo-réfrigérateurs fiables et disponibles « sur étagère ».

L'énergie dissipée par les pertes dans la bobine et son environnement pose moins de problèmes (limitation de la charge et de la durée entre décharge et recharge) lorsque la température de fonctionnement croît puisque l'élévation de température est moindre (figure 5) et que la puissance de refroidissement est supérieure (figure 4).

Par rapport aux bobines conventionnelles NbTi, l'isolement électrique peut être plus épais avec les supraconducteurs à haute température critique (SHTC)

en raison des plus grandes marges de température. La tension de décharge peut être alors plus élevée, d'où une augmentation de la puissance.

Les SHTS sont par conséquent particulièrement intéressants pour les SMES utilisés comme source impulsienne.

Supraconducteurs à haute température critique

Si les SHTC présentent l'énorme avantage de fonctionner à plus haute température que les supraconducteurs conventionnels, ils restent difficiles à élaborer sous forme de conducteurs industriels (longueurs kilométriques) avec des bonnes propriétés de transport du courant sous induction magnétique et à des coûts modérés.

La première génération de conducteur SHTC sont les rubans OPIT (Oxide Powder In Tube) à base du composé supraconducteur BiSrCaCuO dans deux stœchiométries : $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}$ (Bi-2212) et $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}$ (Bi-2223). Leur nom vient du fait que le supraconducteur est introduit dans la matrice initialement tubulaire en argent sous forme de poudre. Cette structure composite multifilamentaire (figure 6) confère au conducteur les propriétés mécaniques et la souplesse nécessaires à son utilisation alors que le supraconducteur est une céramique. La matrice est en argent car c'est l'un des rares matériaux avec l'or à ne pas réagir avec le BiSrCaCuO et à être perméable à l'oxygène, indispensable au supraconducteur. Cette matrice en argent, même alliée, conduit à une contrainte de traction admissible pour le conducteur peu élevée : 100 MPa environ pour dégradation du courant maximum de 5 %. Elle est appelée contrainte mécanique critique. Le ruban doit être renforcé pour améliorer ses performances mécaniques.

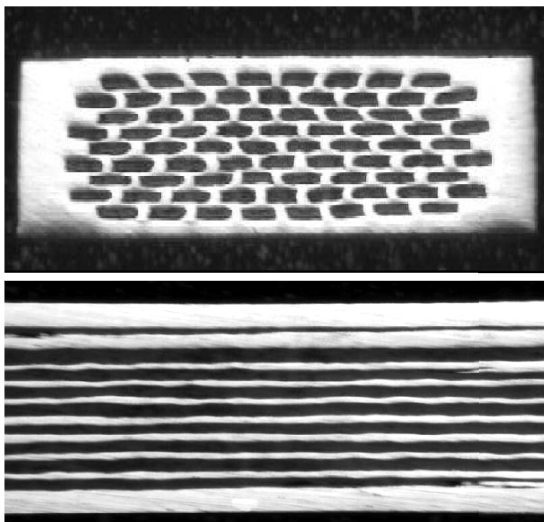


Figure 6 : Coupes transversale et longitudinale d'un ruban supraconducteur de première génération (PIT Bi, photo Nexans)

Les conducteurs YBaCuO déposés sont la deuxième génération de SHTC. Un conducteur déposé (« Coated Conductor ») est un empilement de plusieurs couches

sur un substrat flexible. Cette architecture est complexe car l'YBaCuO ne peut être déposé que sur un support à texture biaxiale avec les bons paramètres de maille et le protégeant de certaines réactions. L'YBaCuO déposé (quelques micromètres) n'est qu'une très petite fraction du conducteur total, mais ses propriétés de transport sont exceptionnelles ; dans certaines conditions d'induction et de température, cette couche d'YBaCuO transporte des densités de courant supérieures à $60\,000\text{ MA/m}^2$. De fait de cette faible fraction supraconductrice, les caractéristiques critiques de conducteurs déposés ne sont pas exprimées en MA/m^2 mais en A par unité de largeur du ruban exprimée en cm. Suivant les architectures, les contraintes mécaniques critiques peuvent être très élevées (700 MPa), ce qui est très favorable pour les SMES.

La figure 7 donne les caractéristiques critiques en A/cm pour les deux générations de SHTC. Elle montre le très fort intérêt des conducteurs déposés puisqu'ils peuvent être utilisés à plus haute température (50 K par exemple) sous induction. Compte tenu des nombreux avantages à fonctionner à la température la plus élevée possible, les conducteurs déposés sont particulièrement intéressants pour les SMES. Ces matériaux sont encore au stade de la recherche et du développement avec des longueurs disponibles hectométriques ; les progrès et les avancées sont rapides.

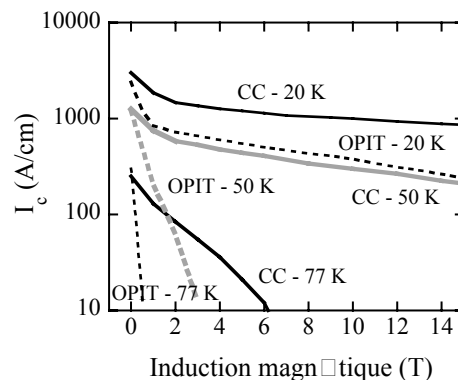


Figure 7 : Courant critique par unité de largeur du conducteur en fonction de l'induction magnétique pour les deux générations de conducteur SCHTC. (Traits pointillés : 1^{ère} génération (OPIT) ; traits pleins : 2^{ème} génération (CC))

4. Projet DGA-NEXANS-CNRS

La DGA (Délégation Générale pour l'Armement) soutient fortement la supraconductivité en France. Les armes électriques comme les lanceurs électromagnétiques nécessitent des impulsions de très grandes puissances. Les SMES sont une des possibilités, seuls ou associés à d'autres systèmes, pour de telles sources impulsives d'énergie.

Après les essais réussis d'un premier SMES de 100 kJ utilisant des rubans Bi-2212 d'Alcatel dans l'hélium liquide (4,2 K), les objectifs du second projet DGA [9] étaient de construire un SMES de 800 kJ fonctionnant

à 20 K avec une cryogénie transparente et de progresser dans les rubans Bi-2212. La température de 20 K est un compromis entre le volume supraconducteur (figure 7) et le coût cryogénique (figure 3). Par ailleurs à 20 K, la chaleur spécifique est déjà suffisamment élevée pour avoir un fonctionnement très stable (figure 5).

La durée spécifiée de décharge du SMES est de 2 s. Cette valeur est très longue pour une source impulsivonne, mais il n'était pas raisonnable de résoudre tous les problèmes dans un même projet. Une décharge en 10 ms est plus appropriée à l'objectif final et cette durée a été étudiée d'un point de vue théorique.

Conducteur supraconducteur

Le conducteur est un des composants clés des SMES. Nexans développe depuis des années des rubans OPIT Bi-2212 avec de fortes densités de courant critique [10]. La ligne d'irréversibilité est plus favorable pour la stœchiométrie Bi-2223 par rapport au Bi-2212. La température d'exploitation du Bi-2223 peut être donc plus élevée. Par contre plusieurs éléments sont en faveur du composé Bi-2212. Son processus de fabrication est plus simple avec un traitement thermique en moins. Par ailleurs et surtout il est possible d'élaborer des fils ronds isotropes en Bi-2212 [11] alors que seuls des rubans minces anisotropes sont possibles avec le Bi-2223. Pour de nombreuses applications, un fil isotrope rond est préférable. C'est pourquoi Nexans développe des conducteurs Bi-2212. Par contre la géométrie d'un ruban ($0.26 \times 4.11 \text{ mm}^2$) convient parfaitement à notre projet.

Le contenu en Bi-2212 est de 33 % en volume. La matrice autour des filaments supraconducteurs est en Ag et la gaine extérieure est en AgMg pour améliorer les propriétés mécaniques. La contrainte de traction critique est d'environ 100 MPa. La figure 8 donne les caractéristiques critiques à 20 K sous des inductions magnétiques longitudinale et transversale. Des mesures 50 % plus élevées indiquent les marges importantes de progression de ces matériaux.

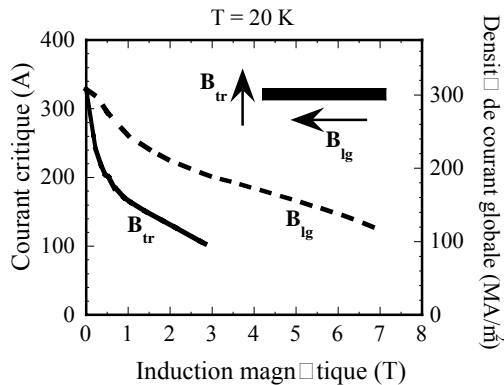


Figure 8 : Caractéristiques critiques d'un ruban PIT-Bi-2212 de Nexans à 20 K.

La capacité de transport d'un ruban seul est trop faible pour un SMES et plusieurs rubans doivent être assemblés. Nous avons choisi de souder trois ou quatre rubans en parallèle. Cet assemblage est réalisé par le passage des rubans dans un bain d'étain. La hauteur du conducteur est contrôlée. L'épaisseur d'étain est de quelques dizaines de μm . Le conducteur est isolé par un ruban en Kapton® déposé autour.

Cette conception de conducteur multi-rubans autorise une redistribution entre les rubans en cas d'un défaut local sur un ruban par exemple. Dans l'enroulement, le conducteur est soumis à des variations importantes tant en inductions magnétiques (amplitude et direction) qu'en contraintes mécaniques. Le conducteur multi-rubans permet de s'adapter à ces conditions variables. Il est possible de faire varier le nombre de conducteurs pour s'adapter aux conditions d'induction magnétique et faire travailler le matériau proche de sa caractéristique critique pour optimiser son utilisation. Le conducteur est renforcé avec un ruban en acier inoxydable (figure 9) dans les zones de la bobine où les contraintes mécaniques sont fortes. La contrainte critique de traction du conducteur atteint alors 170 MPa (100 MPa pour un ruban seul).



Figure 9 : Conducteur renforcé du SMES : 3 rubans supraconducteurs soudés et 1 ruban en acier inoxydable.

Bobinage supraconducteur.

N'ayant aucune spécification sur le champ de fuite, nous avons choisi un solénoïde pour notre SMES. Comparé au tore, un solénoïde demande moins de conducteurs pour une énergie donnée. Sa construction est plus simple aussi. Nous avons retenu un bobinage en galettes et non en couches. Dans l'état actuel du développement des rubans, des casses peuvent arriver pendant l'élaboration et il est important de pouvoir bobiner avec des longueurs variables. Les connexions à l'intérieur d'une galette sont beaucoup plus faciles que dans un bobinage en couche. Ces connexions internes peuvent avoir des résistances très faibles, de l'ordre de la centaine de $\text{n}\Omega$, qui est acceptable pour un SMES impulsivonne. Elles ne posent aucun problème de réalisation. Les galettes offrent aussi un rapport surface de contact sur la distance à la source froide plus favorable que pour un bobinage en couche. Ce point est particulièrement important dans notre cas avec un refroidissement par conduction. Un bobinage en galettes optimise plus facilement l'utilisation du supraconducteur : les galettes peuvent être bobinées avec des conducteurs de section différente selon

l'amplitude de l'induction magnétique et son orientation. Enfin, dans une galette, les rubans ne sont soumis à aucune déformation transversale défavorable comme au niveau du saut de couche.

Par contre, les bobines élémentaires sont en général plus nombreuses dans un enroulement à galettes qu'en couches. Cela augmente son coût, mais en cas d'un problème sur le conducteur, le remplacement est plus simple et moins coûteux. A notre stade de développement, cet argument reste important. Un autre inconvénient avec des galettes simples est la connexion intérieure soumise à une induction magnétique élevée. Nous avons conçu des connexions intérieures spéciales avec de faibles pertes.

Il est important de minimiser le volume du matériau pour une énergie magnétique donnée. Pour un solénoïde, un rapport du diamètre sur la hauteur de 5 [12] optimise l'utilisation du conducteur. Ce résultat ne s'applique pas strictement aux HTS du fait de leur anisotropie. Cependant des travaux récents [13] montrent aussi que les bobines plates restent les plus intéressantes avec les SHTC. Un bobinage en galettes se prête bien à un bobinage plat.

Pour toutes ces raisons, nous avons choisi un bobinage en galettes. Une optimisation, peu poussée, a été effectuée avec l'objectif de minimiser le volume SC. Les contraintes pour cette optimisation étaient (k : nombre de rubans en parallèle) :

- $W = 800 \text{ kJ}$
- $\sigma_{\theta} \leq 80 \text{ MPa}$
- $R_i \geq 150 \text{ mm}$ (rayon intérieur)
- $I_{op} \leq 0,8 \text{ k Min}[I_c(B_{ig}, 20 \text{ K}), I_c(B_{tr}, 20 \text{ K})]$
(k = 3 ou 4)

La contrainte mécanique de 80 MPa reste raisonnable pour un premier enroulement expérimental. En tenant compte des contraintes supplémentaires liées au bobinage et au refroidissement, la contrainte résultante est d'environ 100 MPa. C'est la contrainte la plus forte pour la conception. Le rayon intérieur minimal (150 mm) correspond au rayon minimum de courbure du conducteur. Le facteur d'exploitation de 80 % est un compromis entre le volume supraconducteur et les pertes résistives. La caractéristique champ électrique (E) courant peut être représentée par une loi de puissance et l'exposant « n » est appelé indice de transition résistive :

$$E = E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n$$

où I_c est le courant critique qui correspond au développement du champ électrique critique E_c qui a été fixé à $100 \mu\text{V/m}$.

Cette expression montre qu'un supraconducteur dissipe avant d'atteindre son courant critique et ce d'autant que son indice de transition résistive est faible. Les pertes correspondantes sont appelées pertes résistives.

$$P_{résistives} = \int_{Bobine} E_c I_c(z) \left(\frac{I}{I_c(z)} \right)^{n+1} dz$$

Le courant critique dépend de la position le long du conducteur puisqu'il est fonction de l'induction magnétique (figure 8).

Basé sur un indice de transition résistive de 15 et en supposant que la totalité du conducteur fonctionne à 80 % de son courant critique (I_c indépendant de z), les pertes résistives atteignent 13 W. Cette valeur les surestime nettement puisque les rubans fonctionnent en général en dessous de 80 % de leur courant critique. La diminution des pertes résistives varie avec la puissance $16^{\text{ème}}$ du facteur d'exploitation. Avec un facteur d'exploitation de 0,6 les pertes résistives valent seulement 0,17 W.

Le tableau récapitule quelques paramètres du SMES et la figure 10 montre la distribution des différents conducteurs dans une moitié de la bobine. Aux deux extrémités, les conducteurs sont soumis à une induction magnétique transversale importante (2,5 T) et 4 rubans sont nécessaires pour transporter le courant total de 315 A (figure 8). Heureusement les contraintes mécaniques sont réduites dans cette zone puisque l'amplitude de l'induction magnétique est modeste. Par contre au centre de la bobine, l'amplitude de l'induction est maximale, mais avec une composante essentiellement longitudinale. Les contraintes mécaniques sont fortes et exigent un renfort sous la forme d'un ruban en acier inoxydable. En raison de l'orientation longitudinale favorable (figure 8) de l'induction magnétique, 3 rubans suffisent pour transporter le courant.

Grandeurs	Valeur
Energie stockée	800 kJ
Diamètres intérieur / extérieur	300 mm / 814 mm
Hauteur	222 mm
Courant assigné	315 A
Température de fonctionnement	20 K
Nombre de galettes	26
Inductions mag. maximales (lg/tr)	5,2 T / 2,5 T
Contraintes max de traction	80 MPa

Tableau : Principaux paramètres du SMES 800 kJ avec des rubans Bi-2212.

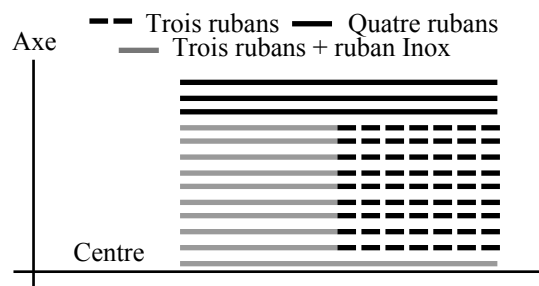


Figure 10 : Répartition des 3 différents conducteurs dans une moitié du SMES.

Le refroidissement par conduction était un des challenges du projet. La cryogénie devait être la plus transparente possible pour les utilisateurs, sans manipulation de fluide cryogénique (hélium ou azote liquides). Nous avons donc basé notre conception sur deux cryo-réfrigérateurs, un pour la bobine et le deuxième, fonctionnant à plus haute température, pour les amenées de courant et l'écrantage thermique. Nous avons choisi deux machines Gifford MacMahon AL330 de Cryomech [14]. Ce sont les cryo-réfrigérateurs les plus puissants du marché autour de 20 K. Un cryo-réfrigérateur est une machine totalement autonome qui fournit des frigories sur un étage froid à partir d'un compresseur entraîné par un moteur électrique. Strictement aucune compétence cryogénique n'est nécessaire pour le faire fonctionner, il suffit de l'alimenter électriquement et de le mettre en route.

Pour refroidir les galettes en minimisant les résistances thermiques, le conducteur isolé est collé via un film adhésif époxy sur une plaque en cuivre avec une « oreille ». Cette oreille est reliée de manière souple à un secteur de distribution en cuivre où la tête froide de cryo-réfrigérateur est vissée (figure 11). Les plaques de cuivre ont une géométrie particulière (figure 11) pour réduire les pertes par courant de Foucault tout en refroidissant efficacement le conducteur. C'est pourquoi la partie intérieure est découpée.

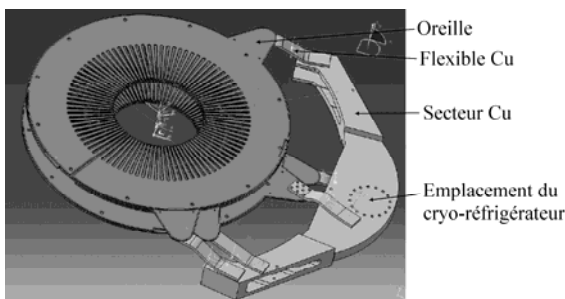


Figure 11 : Principe du refroidissement des galettes collées sur les plaques en cuivre.

Un revêtement époxy isole les plaques de cuivre. Un autre film époxy est déposé de l'autre côté de la galette (8) pour améliorer la planéité puisque la largeur de conducteur varie légèrement (figure 13).

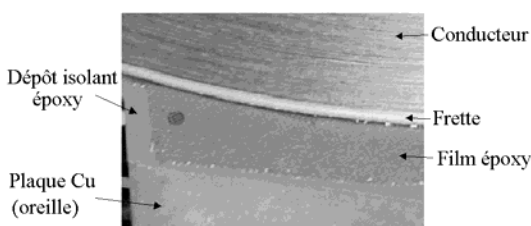


Figure 12 : Détail d'une galette supraconductrice sur son

De nombreuses simulations thermiques avec le logiciel Flux3D® [15] ont été faites pour calculer les distributions de température à partir des résistances thermiques mesurées [16]. Ces simulations ont permis d'optimiser la géométrie des différentes pièces. La marge théorique de la température est de 3,6 K. Par ailleurs les pertes résistives dans les enroulements ont été surestimées.

Néanmoins un réservoir a été ajouté sous le cryo-réfrigérateur au cas où les pertes ou les résistances thermiques seraient plus élevées. Rempli d'hélium liquide, il constitue une source froide supplémentaire avec une température beaucoup plus basse. Sa puissance est donnée par le débit de liquide. Un doigt en cuivre relié au secteur plonge dans le réservoir. Pendant le refroidissement, le réservoir est rempli d'azote pour accélérer la mise en froid et améliorer l'homogénéité du refroidissement puisque les vapeurs refroidissent la bride supérieure d'enroulement par la circulation dans un tube collé sur la bride.

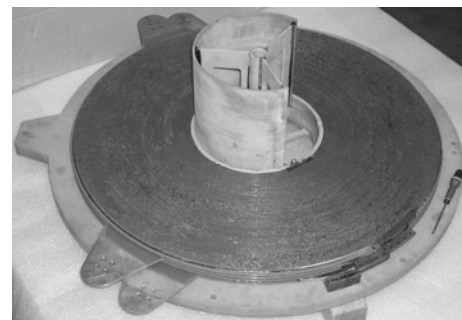


Figure 13 : Galettes en cours d'empilage.

Ce réservoir est très utile pour les essais préliminaires du SMES. Pour tester chaque double galette, des amenées de courants provisoires sont nécessaires. Le réservoir permet de thermaliser les amenées de courant et d'intercepter les pertes très importantes : 11 W. Cet apport thermique rendrait difficile les essais puisqu'il conduirait une température élevée pour les connexions. Si la thermalisation est suffisante, ces amenées de courant refroidissent même les connexions.

Le deuxième cryo-réfrigérateur refroidit un écran thermique et les deux amenées de courants. Afin de réduire les apports thermiques des amenées de courant sur la bobine, un conducteur HTS a été utilisé. C'est un cylindre massif de Nexans en Bi-2212 à l'intérieur d'un tube G10. Une tige en laiton constitue la partie supérieure de l'amenée de courant.

L'enroulement (figure 14) est posé sur l'écran thermique par 3 tiges en matériau composite. L'écran thermique est suspendu à la bride supérieure de l'enceinte à vide. Cette disposition augmente les chemins thermiques. Les brides de l'enceinte à vide (figure 15) ont été optimisées pour réduire leur poids.

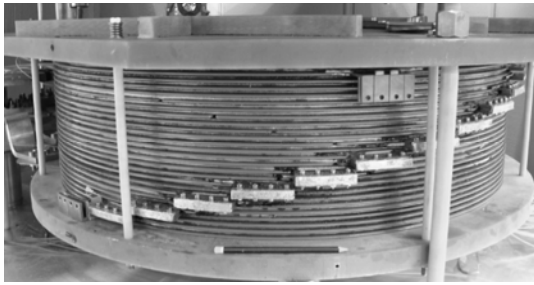


Figure 14 : La bobine supraconductrice avec ses 26 galettes superposées.

La masse de cuivre utilisée dans le SMES est élevée. Ce n'est pas un problème pour un premier modèle expérimental, mais le sera pour de futurs SMES dont les puissances et énergies spécifique devront être élevées. Les caloducs sont une solution. Hyperconducteurs thermiques, ils possèdent des conductivités thermiques jusqu'à 1000 plus fortes que le cuivre.

Essais cryogéniques et électriques partiels

Un premier essai a été mené avec 10 galettes sur les 26. La figure 15 montre l'intérieur du SMES dans cette configuration. L'objectif était de valider la conception cryogénique et de tester les galettes à 20 K. Les contraintes sur le conducteur sont cependant moins sévères : l'induction magnétique est plus faible de même que les efforts mécaniques. Toutes les galettes sont testées dans l'azote liquide (77 K) une fois réalisées, mais les courants critiques à 77 K et à 20 K ne sont pas corrélés puisque les phénomènes d'ancrage à l'origine des courants critiques sont différents à ces deux températures. Nous avons observé néanmoins quelques corrélations. Des cales remplacent les 16 galettes manquantes afin d'avoir la distance correcte entre les deux brides. Des amenées de courant provisoires ont été montées pour tester chaque double galette. Elles sont thermalisées sur le réservoir et les liaisons sont doublées en supraconducteur partout où c'est possible. Les essais ont montré que la thermalisation n'est pas suffisante du fait des faibles surfaces d'échanges disponibles.

Le premier refroidissement a parfaitement réussi. Les galettes sont devenues supraconductrices après 36 heures. La distribution des températures dans le cryostat est très satisfaisante et en général conforme aux calculs. Une résistance et une sonde de température ont été placées sur une connexion intérieure, qui est le point le plus chaud. Ils permettent de mesurer la résistance thermique avec la bride pour valider le modèle simulé. Les valeurs mesurées et simulées sont en très bon accord.

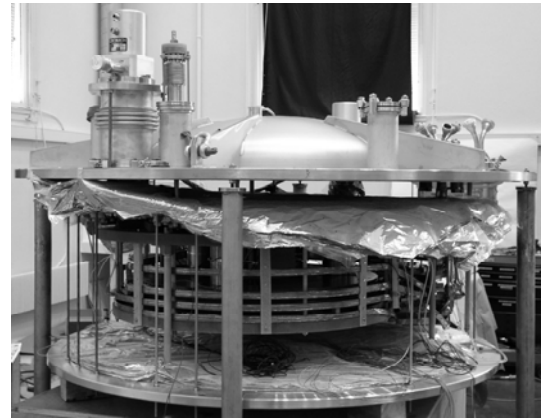


Figure 15 : Intérieur du SMES avec 10 galettes.

La figure 16 donne un cycle typique de fonctionnement du SMES comme source impulsionnelle avec les galettes 1, 2, 3 et 4 série. La décroissance du courant pendant la phase de court-circuit est relativement importante à cause de la faible inductance des 4 galettes (0,46 H comparé à 16,4 H pour les 26 galettes).

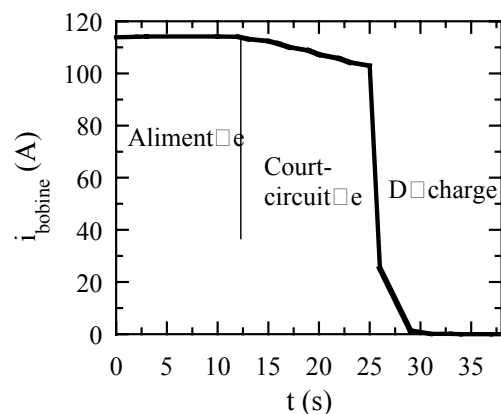


Figure 16 : Evolution du courant de 4 galettes du SMES en modes alimenté, stockage et décharge.

L'évolution temporelle de la puissance et de l'énergie pour une décharge assez rapide des quatre premières galettes est en accord avec les calculs. Cela indique donc que les pertes dans les galettes et le cryostat restent faibles dans ces conditions.

5. Conclusion

Le SMES avec des supraconducteurs à haute température critique apparaît comme une solution particulièrement intéressante pour les sources impulsives de puissance. Si l'énergie massique est limitée par des considérations mécaniques à des valeurs déjà élevées, la densité massique de puissance est nettement plus intéressante et sans limite bien définie. Les SHTC apportent un avantage décisif pour ces SMES impulsifs, notamment la deuxième génération de conducteurs haut T_c en cours de développement avancé. Nous avons conçu et réalisé un SMES de 800 kJ avec des conducteurs « haut T_c » de première génération, les rubans Bi-2212. Ce SMES est refroidi uniquement par conduction pour avoir une cryogénie la plus transparente pour l'utilisateur qui n'a besoin d'aucune compétence cryogénique. Un premier essai avec 10 galettes sur les 26 a été un succès. Le système thermique fonctionne de manière très satisfaisante et conforme aux calculs. Des essais partiels de la bobine ont été très concluants : le courant assigné a été atteint sans tension décelable aux bornes des galettes. Des décharges rapides ont montré que les pertes dans la bobine et son environnement proche sont faibles ; les montées en température sont très limitées. Enfin, les courbes sont en accord avec les calculs.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement A. Boulbes, G. Barthelemy, G. André et P. Chantib pour leur contribution technique majeure et essentielle.

REFERENCES

- [1] J. Miles, R.G. Files, "Observation of persistent current in a superconducting solenoid", *Physical Review Letters*, vol. 10, pp. 93-96, 1963.
- [2] M. Ferrier, "Stockage d'énergie dans un enroulement supraconducteur", *Low Temperature and Electric Power*, Pergamon Press, pp. 425-432, 1970.
- [3] C. A. Luongo, "Superconducting Storage Systems: an overview", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, 1996, pp. 2214-2223.
- [4] H.J. Boenig, J.F. Hauer, "Commissioning tests of the Bonneville power administration 30 MJ superconducting magnetic energy storage unit, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 104, 1985, pp. 302-312.
- [5] F. C. Moon, "The virial theorem and scaling laws for superconducting magnet systems", *Journal Applied Physics*, vol. 53, 1982, pp. 9112-9121.
- [6] CMS
- [7] R. Kreutz, H. Salbert, D. Krischel, A. Hobl, C. Radermacher, N. Blacha, P. Behrens, K. Dutsch, "Design of a 150 kJ high- T_c SMES for a 20 kVA uninterruptible power supply system", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 13, 2003, pp. 1860-1862.
- [8] K. Shikimachi, H. Moriguchi, N. Hirano, S. Nagaya, T. Ito, J. Inagaki, S. Hanai, M. Takahashi, T. Kurusu, "Development of MJ-Class HTS SMES system for bridging instantaneous voltage dips", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, 2005, pp. 1931-1934.
- [9] P. Tixador, B. Bellin, M. Deleglise, J.C. Vallier, C.E. Bruzek, S. Pavard, J.M. Saugrain, "Design of a 800 kJ HTS SMES", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, 2005, pp. 1707-1710.
- [10] E. Flahaut, D. Bourgault, C.E. Bruzek, M. Rikel, P. Herrmann, J.L. Soubeyrou, R. Tournier, "Dynamic heat treatment of BSCCO-2212 tapes with homogeneous properties and high critical current density", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 13, 2003, pp. 3034 - 3037.
- [11] T. Hasegawa, T. Koizumi, Y. Hikichi, T. Nakatsu, R.M. Scanlan, N. Hirano, S. Nagaya, "HTS conductors for magnets", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 12, 2002, pp. 1136 - 1140.
- [12] J.R. Hull, S. M. Schoenung, D. N. Palmer and M.K. Davis, "Design and fabrication issues for small-scales SMES", *Cryogenic Engineering Conference*, Huntsville, Alabama, June 11-14, 1991.
- [13] S. Noguchi, M. Yamashita, H. Yamashita, and A. Ishiyama, "An Optimal Design Method for Superconducting Magnets Using HTS Tape", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 11, No. 1, March 2001, pp. 2308-2311.
- [14] Cryomech, <http://www.cryomech.com/>
- [15] Cedrat & Cedrat Technologies, <http://www.cedrat.com/>
- [16] B. Bellin, P. Tixador, M. Deleglise, J.C. Vallier, S. Pavard, C.E. Bruzek, "Cryogenic design of a 800 kJ HTS SMES", *Journal of Physics: conference series*, vol. 43, 2006, pp. 817-820

Les générateurs de MARX de conception ISL

Benoit MARTIN et Philippe DELMOTE

Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis

5 rue du Général Cassagnou

BP 70034 - 68301 SAINT LOUIS CEDEX France

Résumé : Les générateurs de Marx reposent sur un principe simple décrit en 1923. L'amélioration continue des composants et l'expérience acquise par l'ISL dans la mise en œuvre de ces sources ont permis de maintenir des niveaux de performance très élevés. L'apparition de nouvelles applications nécessitant des alimentations impulsionnelles de fort niveau entretient l'intérêt suscité autour des Marx ; cet article présente un panorama des générateurs développés par l'ISL.

1. Le générateur de Marx

1.1. Présentation

Le générateur de MARX appartient à la famille des générateurs d'impulsions électriques. Son principe de fonctionnement a été décrit par E. MARX en 1923 [1]. Ces générateurs sont une solution simple et économique à la génération de signaux de très forte amplitude ; les niveaux de puissance délivrés couvrent une plage de puissance allant du kW au TW suivant les applications visées [2][3][4].

1.2. Principe

Classiquement, le générateur de MARX fonctionne comme un multiplicateur de tension connectant en série des étages de stockage capacitifs préalablement chargés en parallèle. Idéalement, l'énergie E délivrée à la charge dépendrait directement de la capacité totale C des étages utilisés et de leur tension de charge V suivant l'équation suivante :

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$$

Le schéma présenté *Figure 1* montre le circuit équivalent simplifié d'un générateur de Marx à quatre étages.

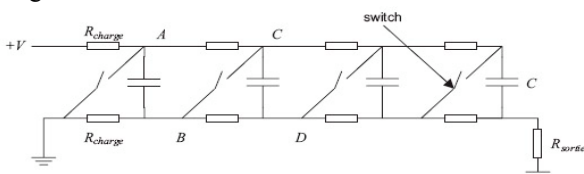


Figure 1 : schéma équivalent du générateur de Marx

Le réseau de résistances (R_{charge}) permet la charge en parallèle des étages capacitifs. Les commutateurs ("switch") commandent le passage de la configuration parallèle à la configuration série ; cette fonction peut être assurée par des systèmes actifs (thyristors) ou des éclateurs à gaz [5].

Lors du déclenchement, la fermeture du commutateur en amont du point A permet sa mise à la masse et provoque une chute rapide du potentiel au point B. La différence de potentiel aux bornes du second commutateur (B-C) vaut maintenant deux fois la tension de charge. En fermant le second commutateur au moment où cette surtension est maximum, on initie une réaction en chaîne se poursuivant d'étage en étage.

La tension maximale théorique atteignable en sortie de générateur est donc le produit du nombre d'étage par la tension de charge statique.

1.3. Limitations

Le fonctionnement décrit dans la partie « principe » est incomplet ; il existe en effet de nombreuses limites pratiques à la « multiplication » de tension au sein des générateurs de Marx. Citons principalement :

- l'action des capacités parasites ;
- les résistances internes des condensateurs et des commutateurs ;
- la maîtrise imparfaite des instants de déclenchement des commutateurs ;

Le rendement global du générateur décroît avec le nombre d'étages utilisés ; les valeurs classiquement obtenues varient de 75% à 50%.

1.3.1. Capacités parasites

La *Figure 2* représente le schéma amélioré de générateur de Marx prenant en compte les différentes capacités parasites d'un étage. C_1 et C_3 modélisent les capacités distribuées entre les armatures des éléments capacitifs et la masse.

C_2 correspond à la capacité équivalente au commutateur E_2 et à celle formée entre deux étages successifs du générateur.

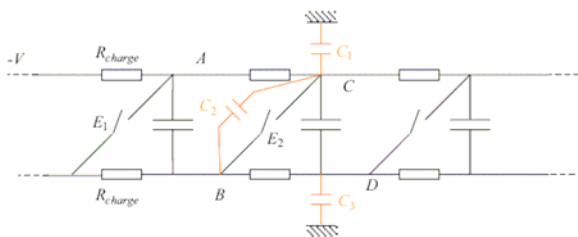


Figure 2 : schéma équivalent du générateur de Marx introduisant les capacités parasites

Supposons le générateur chargé sous une tension statique $-V$. La fermeture du commutateur E_1 provoque l'apparition d'une impulsion d'amplitude $+V$ au point B . Cette impulsion induit une variation du potentiel au point C de $-V$ à V_C . En supposant que la capacité d'un étage est très supérieure à la capacité parasite C_3 , nous pouvons calculer V_C :

$$V_C = -V \cdot \frac{C_1 + C_3}{C_1 + C_2 + C_3}$$

La différence de potentiel V_{E2} aux bornes du commutateur E_2 est alors donnée par la relation suivante

$$V_{E2} = V \cdot \left[1 + \frac{C_1 + C_3}{C_1 + C_2 + C_3} \right]$$

Cette équation met en évidence l'impossibilité d'avoir une multiplication de tension parfaite d'étage en étage. En effet nous avons :

$$\frac{C_1 + C_3}{C_1 + C_2 + C_3} < 1$$

Ceci impose donc $V_{E2} < 2V$. Ce phénomène peut être diminué par l'ajout de condensateurs additionnels en dérivation sur C_1 et C_3 , au détriment toutefois du temps de montée du signal aux bornes des commutateurs.

1.3.2. Résistances internes

Le matériau diélectrique constituant l'isolant des condensateurs présente certaines imperfections :

- un courant de fuite lors de la charge ;
- une impédance interne non nulle lors de la phase de décharge.

Ce dernier point constitue la principale limitation du rendement en énergie et guide le choix du matériau à employer.

Un autre facteur limitant est lié aux commutateurs utilisés. Tant en technologie semi conducteur que dans le cas d'éclateurs pressurisés, la mise en conduction du canal souffre d'une résistivité non nulle. Ceci se traduit par des pertes Joule pénalisant le rendement en énergie.

1.3.3. Synchronisation des commutateurs

Afin d'optimiser le fonctionnement du générateur, il est impératif de réaliser la mise en commutation rapidement et au moment exact où la différence de potentiel est maximale aux bornes du commutateur.

Un déclenchement anticipé limite la multiplication des tensions et dégrade les temps de montée. Un déclenchement trop tardif dégrade le rendement, les condensateurs se déchargeant au travers du réseau de résistances de charge.

1.4. Applications

Les champs d'application des générateurs d'impulsions fort niveau sont extrêmement vastes. Ils couvrent par exemple les domaines suivants :

- chimie (dépollution de gaz, liquides et cendres, déclenchement de réactions, traitement de surfaces, pulvérisation, fabrication de nano poudre...);
- physique fondamentale (génération de champs électromagnétiques intenses, plasmas, implantation ionique...);
- génie électrique (tests de compatibilité électromagnétique, simulateurs de foudre, essais d'isolation...);
- défense (simulateur d'IEMN, RADAR, générateur de rayons X fort niveau, alimentation de tubes microondes et de dispositifs ultra large bande impulsions...).

2. Le concept Marx ISL

2.1. Besoin « historique »

L'ISL profite d'une expérience de 40 années dans l'étude, la conception et la réalisation de générateurs de MARX compacts. Initialement, ces sources ont été développées pour les besoins propres de l'Institut dans le domaine de la métrologie rapide ; les applications visées étaient alors la radiographie-éclair de projectiles par rayons X [6]. Par la suite, le champ des applications s'est élargi vers d'autres domaines et les générateurs ont évolué continuellement jusqu'à aujourd'hui.

2.2. Présentation générale

Le concept de générateur de Marx ISL repose sur cinq points clés :

- utilisation de capacités céramiques hautes performances ;
- générateurs modulables (tension de charge et nombre d'étages ajustables aisément) ;
- structure coaxiale simple et robuste ;
- commutation par éclateurs pressurisés à faible gigue ;
- systèmes autonomes, compacts et fiables.

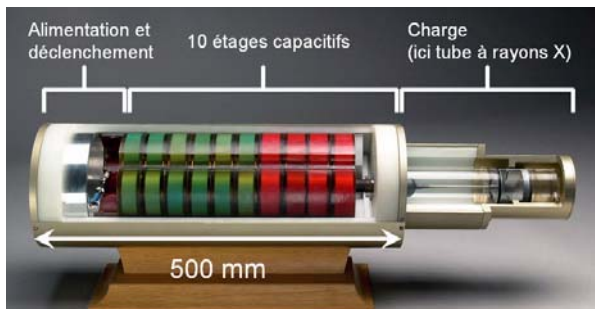


Figure 3 : configuration générale Marx ISL

La Figure 3 représente la configuration standard d'un générateur de Marx ISL. A l'extrémité arrière se trouve un module d'alimentation et de déclenchement. Ce dernier est basé sur un convertisseur statique basse tension (24 V) – haute tension (50 kV) permettant de charger les étages de capacités à partir de batteries. Il intègre également le dispositif de déclenchement permettant de piloter le Marx à distance.

Le corps du générateur est composé d'un cylindre métallique contenant les étages capacitifs (ou « galettes »). Le nombre d'étages embarqués peut être rapidement modifié suivant le besoin en énergie de l'application finale.

La pointe avant comprend une partie isolante en polyéthylène haute densité et une sortie coaxiale. Ici un tube de radiographie RX est monté.

2.3. Technologie

2.3.1. Etages élémentaires

La Figure 4 détaille la constitution du corps des générateurs et celle d'un étage élémentaire. Chaque étage comporte :

- plusieurs condensateurs céramiques assemblés en parallèle ;
- une plaque métallique en fer à cheval permettant l'interconnexion des armatures de condensateurs ;

- deux demi-éclateurs sphériques pour la commutation ;
- une « fenêtre » optique permettant aux éclateurs de s'éclairer mutuellement ;
- deux résistances de charge ;
- deux contacts hautes performances permettant l'assemblage.

L'ensemble de ces éléments est coulé dans une résine isolante garantissant une tenue mécanique élevée.

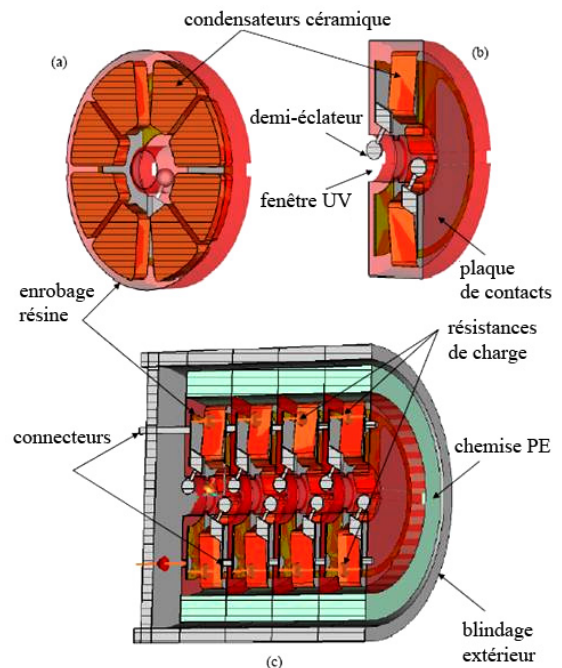


Figure 4 : coupes 3D d'étages élémentaires (a) et (b) ; assemblage de quatre étages (c)

2.3.2. Les condensateurs

Les performances globales du générateur dépendent fortement des condensateurs utilisés pour stocker l'énergie. Différents matériaux céramiques ont successivement été testés pour réaliser les condensateurs Haute Tension ISL.

Les capacités actuelles utilisent le titanate de strontium comme diélectrique. Ce matériau permet de palier au phénomène d'électrostriction du titanate de baryum initialement employé. Ce dernier induisait une perte de capacité en fonction de la tension de charge ainsi que des risques d'affaiblissement mécanique des galettes.

Afin d'améliorer la compacité des générateurs à haute énergie, la géométrie des condensateurs a été modifiée pour optimiser le facteur de remplissage. Les dernières générations de galettes intègrent désormais des capacités sectorisées (Figure 5).

Ces différentes améliorations ont permis de passer de 8 J stockés par étage sous 30 kV à 29 J sous 80 kV [7].



Figure 5 : évolution de la géométrie des condensateurs

2.3.3. Éclateurs

Afin d'obtenir une commutation optimale, différents points sont à respecter :

- maîtrise des écartements inter électrodes ;
- état de surface lisse des électrodes afin de garantir une bonne homogénéité du champ ;
- géométrie symétrique des électrodes afin de pouvoir utiliser les générateurs sur deux polarités ;
- maîtrise du milieu diélectrique (type de gaz, pression, hygrométrie...).

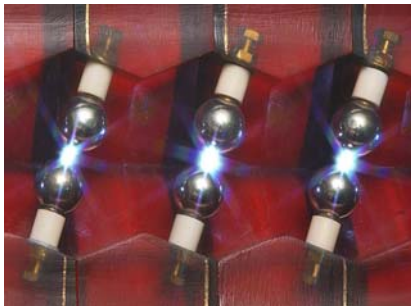


Figure 6 : éclateurs au moment de la commutation

La géométrie coaxiale des générateurs ISL permet aux éclateurs de se pré-ioniser mutuellement via le flash UV généré lors du claquage. Ceci favorise la synchronisation en minimisant fortement la phase statistique précédant la formation des décharges (*Figure 6*).

2.3.4. Résistances

Les résistances de charge sont soumises à de fortes contraintes lors des décharges réalisées en circuit ouvert. Dans ce cas de figure, l'énergie délivrée par le générateur retourne à la masse en les traversant ce qui peut provoquer leur destruction. L'emploi de composants spécifiques hautes performances a permis de fiabiliser le fonctionnement des générateurs sur toute impédance de sortie (*Figure 7*).

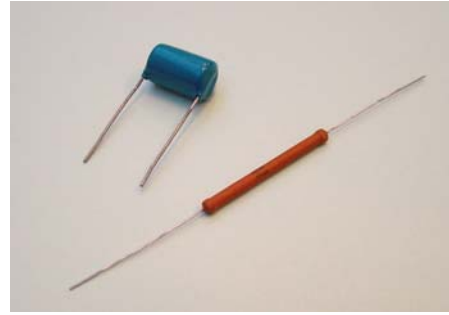


Figure 7 : résistances Haute Tension (compacte : nouvelle génération / longue : ancienne génération)

3. Performances

Différentes versions et générations de générateurs Marx sont actuellement en usage à l'ISL. Les tensions crêtes atteignables en circuit ouvert s'échelonnent de 400 kV à 1 MV avec des énergies délivrées pouvant atteindre 1.2 kJ. Ces générateurs peuvent fonctionner en environnement difficile (humidité, température, vibrations...) et présentent une sûreté de fonctionnement éprouvée.



Figure 8 : Générateurs compacts 400 kV (image du haut) et 680 kV (image du bas)

La *Figure 8* montre deux générateurs ISL. Le premier a un volume de 15 litres. Il peut recevoir 10 étages 40 kV ou 7 étages 50 kV suivant le type de galettes installées. Dans cette configuration, il peut délivrer 80 J à la charge.

Le deuxième accueille 17 étages 40 kV ; il est ici présenté avec son convertisseur HT à commande

optique. L'ensemble constitue un dispositif autonome, à sécurité de fonctionnement élevée et d'emploi aisé.

4. Simulation et mesures

4.1. Modèles numériques

Le processus d'amélioration des générateurs de Marx à l'ISL nécessite la vérification de certaines hypothèses au moyen de simulations. Cette méthode permet l'identification rapide et à moindre frais des pistes d'améliorations qui seront ensuite validées lors d'expérimentations. Deux approches complémentaires sont étudiées : les modèles comportementaux compacts et les modèles 3D par éléments finis.

4.1.1. Modèle compact

L'ISL a développé un modèle PSPICE avancé de générateurs de Marx [8], décrivant fidèlement l'influence d'un maximum de phénomènes physiques. Les principaux éléments intégrés à ce modèle sont :

- les capacités parasites entre les étages ainsi qu'entre les armatures et la masse ;
- les inductances parasites ;
- la résistance parasite fixe des circuits ;
- la résistivité de l'arc électrique dépendant de l'énergie ;
- le retard de pré-claquage dépendant de la surtension dynamique des éclateurs ;

Les deux derniers points ont été réalisés en implémentant le calcul de la résistance d'arc R selon A.E.Vlastos [9] :

$$R = A \cdot I \cdot \left(\int_0^{\tau} i(t)^2 dt \right)^{\frac{3}{5}}$$

ainsi que l'expression du retard de pré claquage de J.C. Martin [10] :

$$t_s = \frac{d}{0.11} \cdot \left(K \cdot \frac{p^n}{V_b} \right)^6$$

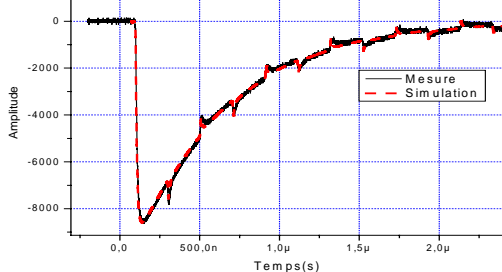


Figure 9 : comparaison Mesure - Simulation d'une décharge d'étage élémentaire

La Figure 9 illustre la bonne concordance entre les mesures et les simulations réalisées. Le modèle

compact offre l'avantage d'une grande rapidité, mais nécessite une caractérisation préalable des générateurs.

4.1.2. Modèle 3D

L'augmentation rapide de la puissance de calcul et de l'efficacité des codes numériques 3D laisse envisager la possibilité de modéliser totalement les générateurs. A l'heure actuelle, il est possible d'étudier des sous ensembles séparément pour déterminer certains paramètres tels les capacités parasites, les couplages complexes à l'intérieur du générateur...

4.2. Métrologie

Afin de caractériser finement ses générateurs, l'ISL a développé ses propres moyens de mesure et de calibration non perturbants, large bande et fort niveau :

4.2.1. Cellule de calibration



Figure 10 : Cellule coaxiale

Cette cellule permet la calibration des sondes au sein d'une géométrie identique à celle des générateurs. Elle dispose de deux transitions ultra large bande autorisant la mesure des fonctions de transfert et des pertes d'insertions induites par les dispositifs de mesure.

4.2.2. Sondes

Un large panel de sondes permet d'accéder à l'ensemble des grandeurs physiques en sortie des générateurs :

- sondes de champs E et H ;
- mesures de courants (gorge de courant) ;
- mesures de tensions (diviseur résistif).

4.2.3. Exemple de mesure de tension

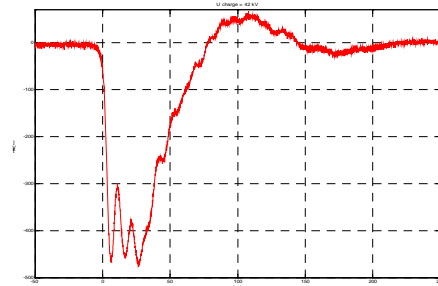


Figure 11 : mesure à l'aide du diviseur résistif ISL

La *Figure 11* représente la tension délivrée par un Marx classe 1 MV sur une charge spécifique (50 Ω , fréquence de coupure haute 1.7 GHz). Le niveau crête obtenu atteint 475 kV.

5. Nouvelles applications et perspectives

Les utilisations classiques des générateurs de Marx à l'ISL concernent essentiellement les domaines de la radiographie éclair et celle des sources microondes.

Une application émergente et à fort potentiel consiste à utiliser le générateur de Marx comme source primaire pour des systèmes Ultra Large Bande impulsions [11]. En effet, couplés à un dispositif spécifique de mise en forme, ce type de générateur constitue une source autonome de signaux à large spectres. Inversement à la problématique des tubes micro-ondes, cette application ne nécessite qu'un faible apport d'énergie. Cette contrainte étant levée il est alors plus aisé d'envisager des sources ultracompactes, répétitives dont les points clés sont le niveau crête commuté, la forme de l'impulsion et la fréquence de répétition.

6. Conclusion

Malgré l'âge et l'apparente simplicité du concept Marx de 1923, la conception et la mise en œuvre de générateurs performants, polyvalents et fiables nécessitent une expertise rigoureuse et le meilleur de la technologie actuelle. Les générateurs actuellement en service garantissent déjà un niveau de performance élevé pour les applications classiques de l'ISL telles la radiographie éclair et l'alimentation de tubes micro-ondes.

Les développements engagés visent à rajouter de nouvelles possibilités aux sources actuelles :

- montée en fréquence de répétition
- maîtrise de l'allure temporelle des signaux générés (raidissement des fronts, signaux à valeur moyenne nulle),
- amélioration du rendement et flexibilité de reconfiguration (tension de sortie et énergie délivrée définies de façon indépendante).

Ces travaux élargissent encore les potentialités des générateurs ISL en permettant leur emploi pour les applications Ultra Large Bande en régime impulsionsnel.

7. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier très vivement J. Wey, chercheur, ainsi que R. Charon, J.-P. Dupéroux et F. Bieth, ingénieurs, dont les expertises ont permis de remarquables améliorations.

8. Références

- [1] E. Marx, Deutsches Reichpatent 455 933, 1923
- [2] R. Spielman, W. Stygar, K. Struve et J. Seamen PBFA Z: A 55 TW/4.5MJ Electrical Generator Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference, 12-16 mai 1997, Vol.1, pp. 1235-1239.
- [3] L. Veron et J.-C. Brion Experimental Study of a Repetitive MARX Generator IEEE Conference Record, ICOPS 2003, 2-5 juin 2003, p.309.
- [4] W.J. Carey Generation of Sub-Nanosecond Pulses Using a Solid State MARX with Trapatt Diode Switches 21th International Power Modulator Symposium, Costa Mesa, Californie, USA, 1994.
- [5] G. Schaefer, M. Kristiansen, A. Guenther Gas Discharge Closing Switches Advances in Pulsed Power Technology Series, Vol.2, ed. Schaefer-Kristiansen-Guenther, 1990.
- [6] F. Jamet, G. Thomer Flash Radiography Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 1976.
- [7] R. Charon, J.-P. Dupéroux, P. Raymond Brevet n° 2 823 033 / 2 890 261 / 2 890 228
- [8] B. Martin, P. Raymond, J. Wey New model for ultracompact coaxial Marx pulse generator simulations Review of Scientific Instrument, 77, Avril 2007.
- [9] A.E. Vlastos The Resistance of Spraks IEEE Journal of Applied Physic, 43, pp. 1986-1989, Avril 1972.
- [10] J.C. Martin Nanosecond Pulse Techniques Rapport SSWA/JCM/704/49, Atomic Weapon Research Establishment, Royaumes Unis, Avril 1970.
- [11] J.R. Mayes et al. The Marx Generator as an Ultra-Wideband Source IEEE conference on Pulsed Power and Plasma Science 2001.

Turbines-Pompes et Alternateurs-Moteurs de centrales hydrauliques

Gérard HEMERY et Jean-Bernard HOUELINE

ALSTOM Power (France)

Résumé : Cet article traite des particularités des Turbines-Pompes et des Alternateurs-Moteurs associés équipant les centrales de Pompage-Turbinage. Il vient en complément d'un article paru en Mars 2005 sur les alternateurs lents de grande puissance pour centrales hydrauliques.

Le développement des centrales de pompage s'est accéléré dans les années 70 suite au développement des centrales nucléaires. Actuellement, des enjeux plus spécifiques aux réseaux électriques contribuent à maintenir et même à renforcer le rôle de ce type de centrales.

Dans cet article et sur la base de nombreuses références, nous présentons les principales spécificités des Turbines-Pompes qui, associées à des aspects novateurs, sont développées par ALSTOM. Nous exposons également les principales caractéristiques hydrauliques prises en compte dans une méthodologie utilisée pour le développement du tracé hydraulique de ce produit. La spécificité des alternateurs-moteurs y est également discutée ainsi que la technologie et les solutions techniques adoptées par ALSTOM. Enfin, nous développons l'apport et le potentiel offert par la vitesse variable sur le produit Turbine-Pompe.

1. Introduction

Les centrales hydrauliques équipées de Turbines-Pompes présentent, outre le fait de stocker de l'énergie, une flexibilité d'exploitation permettant d'augmenter la production d'énergie lorsque la demande se fait nécessaire et de réguler ainsi les flux de puissance.

Conjointement avec le développement des énergies renouvelables (éolien, solaire, ...) qui produisent de l'électricité quand les conditions sont favorables mais qui ne peuvent pas la stocker, les centrales de Pompage-Turbinage offrent le moyen le plus efficace d'un stockage important d'énergie électrique à un niveau de coût acceptable.

En effet et afin de satisfaire de soudaines variations de demandes d'énergie, une large capacité de puissance doit être rapidement disponible afin d'être restituée aux heures de pointe. Pour cela, l'excès de courant produit pendant les heures creuses est alors utilisé pour stocker, par pompage, de l'énergie potentielle dans un bassin supérieur. L'eau ainsi accumulée est alors utilisée, par turbinage, à la production d'énergie aux heures de pointe.

Il y a plus de cinquante ans maintenant, ALSTOM développait les premières unités de Turbines-Pompes réversibles. Depuis, le nombre de projets réalisés et le nombre de tracés de Turbines-Pompes développés n'ont pas cessé d'augmenter.

Le développement des centrales de Pompage-Turbinage est dorénavant lié à de nouveaux impératifs. Outre le fait d'emmagasiner l'énergie,

s'ajoute un besoin de réguler les échanges d'énergie sur les réseaux de transport d'électricité de plus en plus sollicités : régulation des flux, stabilité, réactivité deviennent les maîtres mots.

Actuellement, la part la plus importante du marché des centrales de Pompage-Turbinage concerne des sites de moyenne à haute chute (50 m à 600 m environ) couverts par des Turbines-Pompes de type centrifuge. Leur tracé peut être considéré comme bien maîtrisé maintenant. Cependant, les spécificités propres à chaque site ou encore des conditions de fonctionnement particulières associées à des niveaux de performances de plus en plus élevés font que le développement d'un tracé de Turbine-Pompe présente, à chaque fois, un nouveau challenge.

Sur la base de très nombreuses références, ALSTOM a développé et continue à améliorer le niveau de performance de ce type de machine en utilisant, à la fois, ses connaissances et son savoir faire dans les domaines du tracé hydraulique, de la simulation numérique des écoulements et de sa capacité à réaliser des essais sur des modèles réduits au sein de son laboratoire (Ref. 1 et 2). La conception et les caractéristiques mécaniques des Turbines-Pompes sont également développées et continuellement améliorées afin d'obtenir et de garantir un haut niveau de fiabilité.

Outre des spécificités hydrauliques bien particulières, les centrales de Pompage-Turbinage des sites de moyenne à haute chute nécessitent des

alternateurs-moteurs entraînés à des vitesses relativement importantes (souvent supérieure à 300 tr/min). Il en résulte des contraintes spécifiques à ces machines auxquelles ALSTOM a apporté des solutions fiables.

A la différence des alternateurs lents de grande puissance, dont les challenges sont principalement centrés sur la stabilité dimensionnelle de la machine pendant tous les modes possibles de fonctionnement et les problèmes rencontrés pour le montage, les alternateurs-moteurs sont caractérisés par des sollicitations mécaniques sévères, ainsi que par le refroidissement des parties actives.

2. Historique et spécificités des Turbines-Pompes développées par ALSTOM

Depuis plus de cinquante ans et afin de satisfaire de nombreux projets nationaux et internationaux couvrant tous les domaines d'application de ce type de machine, ALSTOM a développé et mis en service un très grand nombre de Turbines-Pompes mono étage ou multi étages tels que :

- Des Turbines-Pompes de type axial pour les basses chutes ≤ 15 m
- Des Turbines-Pompes de type Hélico centrifuge pour des moyennes chutes variant de 15 à 55 m
- Des Turbines-Pompes de type centrifuge, mono étage pour des sites de moyenne à haute chute (50 à 600 m) ainsi que des machines multi-étages pour des chutes plus importantes encore (jusqu'à 1200 m) incluant des unités à double étage réglable.

Pour ALSTOM, les premières commandes furent des Turbines-Pompes de type axial pour les centrales hydrauliques d'Argentat et de Cambeyrac en 1953 ainsi que celle de Saint Malo en 1956. Il est aussi important de citer l'usine marémotrice de La Rance, proche du Mont Saint Michel, qui a été commandée par la société EDF en 1961. Les 24 unités de cette centrale (10 MVA/10 MW, 11 m de chute) peuvent fonctionner aussi bien en mode Turbine qu'en mode Pompe en remontant l'eau de mer dans un bassin supérieur en fonction des marées.

Ensuite, 4 groupes de Turbines-Pompes de type Hélico centrifuge ont été développés pour la centrale de Torrejon en Espagne. Ces 4 unités,

commandées en 1960, sont en fonctionnement depuis 1966.

Le développement des centrales de Pompage-Turbinage s'est accéléré dans les années 70 avec l'apparition des centrales nucléaires et le besoin de stocker l'énergie pendant les périodes creuses. Pendant cette période, le marché le plus important concerne l'aménagement de sites de moyenne et haute chutes couvert par des Turbines-Pompes de type centrifuge mono étage (Fig.1). En France, nous pouvons citer nos principales références concernant l'aménagement des centrales hydrauliques de Revin (1970, 4 unités de 200 MVA/188 MW, 240 m de chute), de Le Cheylas (1973, 2 unités de 270 MVA/252 MW, 240 m de chute), de Montézic (1975, 4 unités de 250 MVA/212 MW, 240 m de chute) ou encore, en Espagne, pour l'aménagement de la centrale de Tajo-Encantada (1972, 4 unités de 92 MW, 380 m de chute).

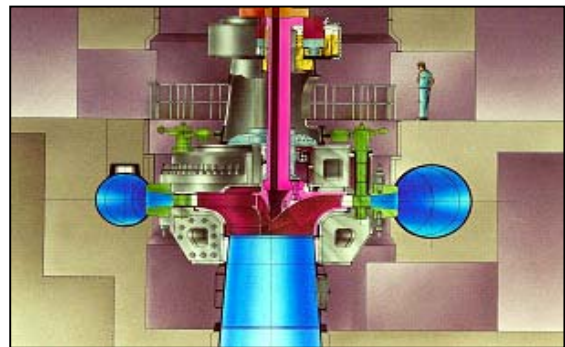


Figure1 : Coupe machine d'une Turbine-Pompe de type centrifuge

De 1970 à 1980, ALSTOM a également commencé à développer des Turbines-Pompes multi-étages qui, pour des chutes supérieures à 800 m, présentent des niveaux de performances hydrauliques et de fiabilité supérieurs aux Turbines-Pompes mono-étage. Outre un encombrement sensiblement plus réduit, ce type de machine divise la chute totale par le nombre d'étages. En conséquence, les niveaux de contrainte dynamique ainsi que les niveaux de vibration de la machine sont fortement réduits. Cette technologie de Turbines-Pompes multi-étages a été mise en œuvre, en France, pour les centrales hydrauliques de La Coche (1971, 2 unités de 75 MW, 900 m de chute, 5 étages) et de Bissorte 2 (1980, 4 unités de 156 MW, 1194 m de chute, 5 étages).

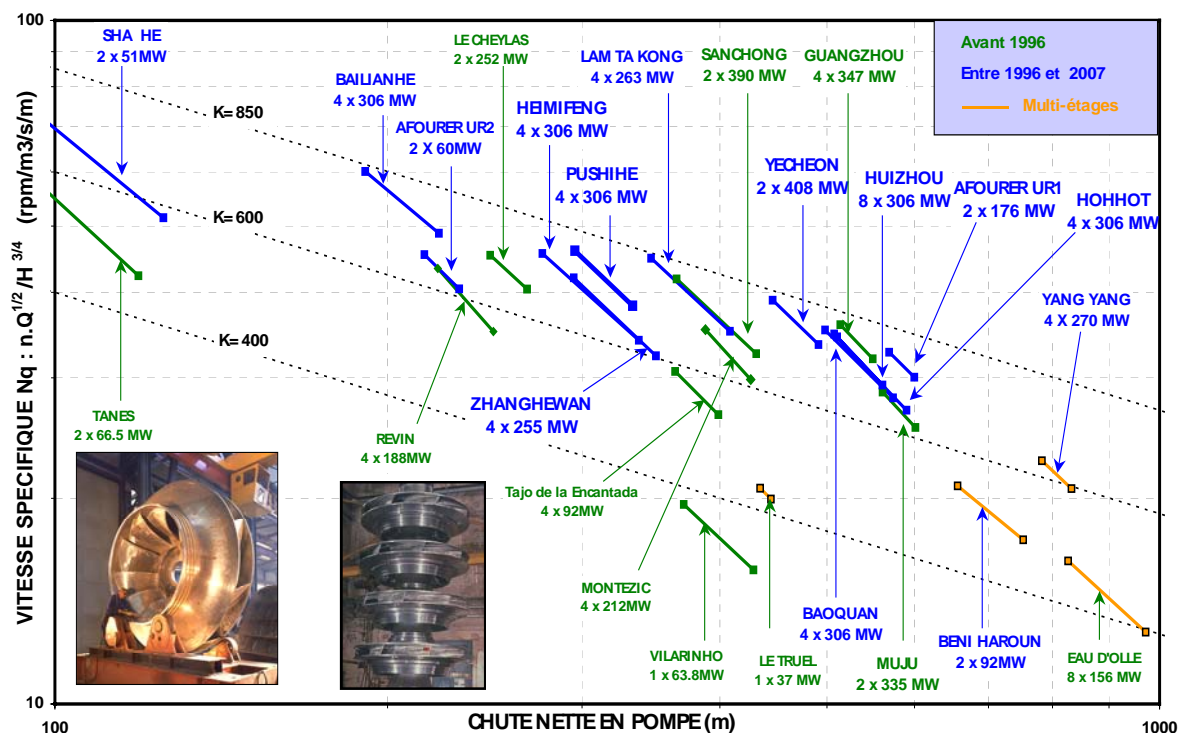


Figure 2 : Principales Références de Turbines-Pompes ALSTOM

Nous pouvons également noter la réalisation de la toute première unité à double étage réglable pour la centrale de Le Truel (1979, 37 MW, 438 m de chute) en fonctionnement depuis plus de 20 ans maintenant.

L'expérience acquise a pu être reconduite et étendue de façon plus importante encore à l'étranger à partir du début des années 80. ALSTOM a ainsi développé et fourni des équipements hydroélectriques, en Chine, pour la centrale de Guangzhou 1 (1989, 4 unités de 347 MW, 510 m de chute) ainsi qu'au Portugal, pour les centrales de Vilarinho 2 (1981, 1 unité de 64 MW, 380 m de chute) et de Torrao (1982, 2 unités de 74 MW, 52 m de chute). Les Turbines-Pompes de ce dernier projet présente la particularité de disposer d'un concept développé à l'origine par ALSTOM. En effet, la fonction d'organe de garde et de sécurité est réalisée, non pas par l'implantation d'un robinet sphérique ou d'une vanne « papillon » mais par l'intermédiaire d'une vanne « fourreau » située entre le distributeur et l'avant distributeur de chaque machine.

Dans les vingt dernières années et dans le cadre de très nombreux projets internationaux, le nombre de nos réalisations n'a cessé de croître (Fig.2). L'ensemble de ces projets de Turbines-Pompes ne représente pas moins de 125 unités en fonctionnement pour une puissance totale installée de plus de 21 000 MW. De part le monde, 20% des unités ont été construites par ALSTOM. Celles ci couvrent un large domaine de chute variant de 10 m à 1200 m pour des niveaux de puissance unitaire compris entre 5 MW et 410 MW.

Plus récemment, de 1996 et 2007, quinze projets ont été réalisés. Ces projets concernent des groupes réversibles mono étage ainsi qu'un projet de machine double étage. Parmi ceux ci, nous pouvons citer les sites pour lesquels les machines sont actuellement en fonctionnement : Lamtakhong (Thaïlande), Alqueva (Portugal), Shahe (Chine), YangYang (Corée), Afourer UR1 et UR2 (Maroc), Beni Haroun (Algérie) ou encore en cours de construction ou de développement : Zhanghewan, Baoquan, Bailianhe, Huizhou, Heimifeng, Hohhot, et Pushihe (Chine) ainsi que Yecheon (Corée).

Ces succès, associés à la satisfaction de nos clients, ont été obtenus grâce à une solide expérience et la compétence d'ALSTOM dans la maîtrise de la technologie des Turbines-Pompes.

La maîtrise de cette technologie est également associée à l'aspect novateur du produit que nous développons. En terme de référence dans ce domaine, nous pouvons citer en exemple l'aménagement des centrales de Naussac (France) et de YangYang (Corée).

La centrale de Naussac (1997, 3 unités de 3 MW, 56 m de chute) est équipée de Turbines-Pompe de type diagonal ou « Deriaz » (Ref. 3). Il s'agit d'une turbomachine réversible, à flux diagonal, avec distributeur réglable et pales orientables, capable de régler son débit et de s'adapter aux grandes variations de chute. Outre le souci d'intégrer le mieux possible la centrale dans l'environnement (Fig.3), ces groupes sont qualifiés de Turbines « Vertes ».



Figure 3 : Vue générale de la centrale de Naussac

Les trois groupes sont en effet conçus pour éviter les risques de pollution de l'environnement et fonctionnent sans huile grâce à des technologies résolument modernes. Le palier-joint hydrostatique et les organes de commande des pales de la roue sont revêtus de céramique et fonctionnent à l'eau, de même que les robinets de garde et les vannes aval.

La centrale de YangYang (2004, 4 unités de 258 MW, 798 m de chute) est, quant à elle, équipée de Turbines-Pompe à double étage réglable (Ref. 4). La réalisation de ce projet a représenté un challenge technologique et industriel très important tant d'un point de vue hydraulique que mécanique. Ce type de machine (Fig. 4) présente des niveaux de performance hydraulique et de fiabilité supérieurs aux Turbines-Pompes mono-étage pour cette gamme de chute. Le très bon niveau de performance et un excellent comportement vibratoire mesurés sur site ont confirmé les observations obtenues sur modèle réduit. Ce succès industriel et cette référence mondiale ouvrent à ALSTOM la possibilité de mettre en œuvre cette technologie de Turbines-Pompe à double étage réglable pour des chutes pouvant atteindre 1200 m.

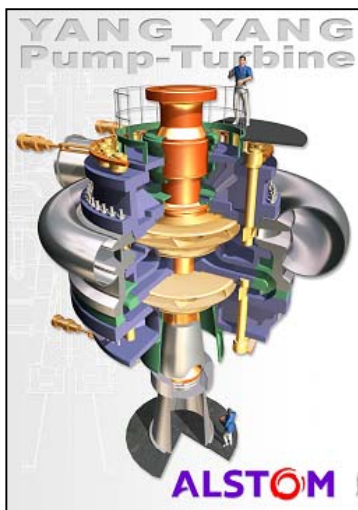


Figure 4 : Coupe machine de la Turbine-Pompe à double étage réglable de YangYang (Corée)

3. Caractéristiques du Tracé Hydraulique

En ce qui concerne les Turbines-Pompe de type centrifuge, les projets récemment réalisés couvrent un large domaine de chute nominale variant de 66 m à 800 m avec des diamètres de roue (diamètre haute pression) de 2,7 m à 6,0 m. En terme de vitesse spécifique, cela signifie une gamme de projets qui s'étend de $Nq = 23$ à 74. Cette diversité a pour conséquence d'engendrer une variété de forme et de tracés hydrauliques différents les uns des autres.

De plus, les caractéristiques uniques de chaque site associées à des particularités techniques de fonctionnement des machines imposent de prendre en compte les spécificités de chaque projet afin de développer le tracé hydraulique adéquat pour atteindre les niveaux de performances requis. A chaque projet correspond donc un tracé hydraulique adapté et intégralement nouveau.

Outre les très hauts niveaux de rendements requis dans une large plage de fonctionnement en Pompe comme en Turbine, les principales caractéristiques spécifiques de projets sont :

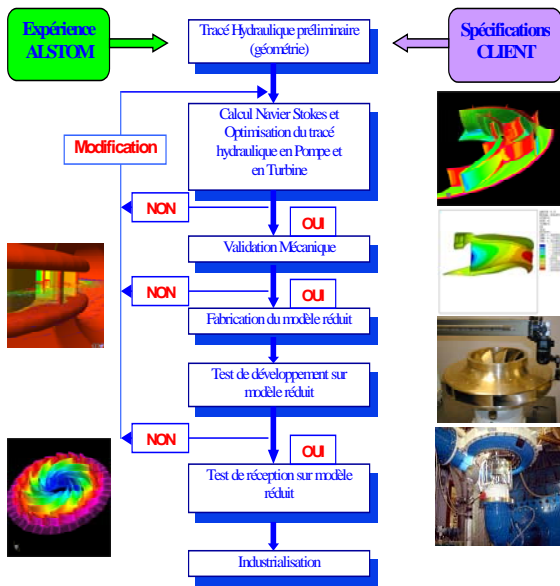
- Un domaine de variation de fréquence du réseau qui peut atteindre $\pm 2\%$ de la fréquence nominale
- Un marnage en chute qui peut varier de 6% à 40% de la chute nominale
- Des niveaux de fluctuation de pression qui doivent être maîtrisés, particulièrement entre la roue et le distributeur ainsi que dans l'aspirateur
- Des requis de débit minimum et de puissance absorbée maximum en Pompe
- Des requis de puissance minimum en Turbine, ...

Une grande variation de chute associée à une importante variation de fréquence du réseau conduit à augmenter la plage de fonctionnement de la machine. Dans ce cas et afin d'éviter tout risque d'érosion par cavitation, le tracé hydraulique optimal de la roue s'avère être un challenge important.

Les caractéristiques ci dessus soulignent les raisons pour lesquelles le développement du tracé hydraulique de tous les composants d'une Turbine-Pompe est toujours un défi. Notre savoir faire, associé aux connaissances du tracé hydraulique des Turbines-Pompes, à la capacité de nos moyens de calculs et à l'utilisation de codes CFD, nous permet une optimisation de plus en plus précise du tracé hydraulique de tous les composants de telles machines.

La méthodologie utilisée pour le développement du tracé hydraulique des Turbines-Pompes est résumée dans le graphique ci dessous (Fig. 5).

Figure 5 : Méthodologie de tracé hydraulique



Quelque soient le projet et le domaine de vitesse spécifique, la méthodologie ainsi que les outils de calculs utilisés restent identiques.

Pour tous les composants (Bâche spirale, avant-distributeur, distributeur, roue et aspirateur), la définition géométrique du tracé hydraulique est la première étape du processus. Cette tâche est réalisée en utilisant des programmes de tracé développés par ALSTOM. Ensuite et grâce à l'utilisation appropriée de codes de calcul (e.g. CFX®) permettant la simulation numérique de l'écoulement, le calcul numérique dans les différents composants de la machine est réalisé (Fig. 6).

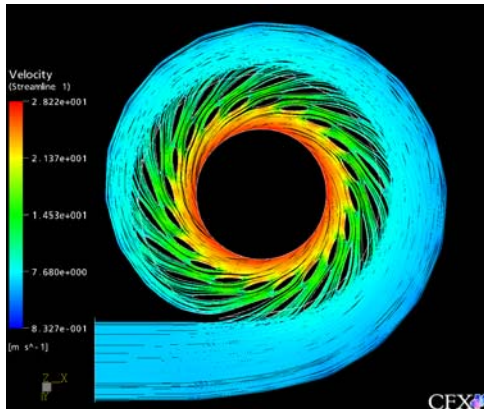


Figure 6 : Exemple de calcul CFX® dans une bâche

L'objectif de cette simulation numérique est de vérifier si le comportement de l'écoulement ainsi que les critères hydrauliques éprouvés sont satisfaits pour un

fonctionnement optimal de l'ensemble de la machine, ceci en Pompe comme en Turbine. Ce processus d'optimisation du tracé hydraulique est conjointement réalisé avec l'étude du comportement mécanique de

tous les composants. Les calculs mécaniques sont effectués en utilisant des codes de calcul par éléments finis (e.g. ANSYS®) (Fig. 7).

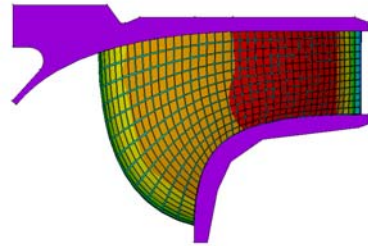


Figure 7 : Exemple de calcul mécanique sur une roue

Même si tous les composants ont une grande importance et peuvent affecter le comportement hydraulique global de la Turbine-Pompe, la roue reste néanmoins l'élément clef pour satisfaire les performances requises. C'est la raison pour laquelle une attention toute particulière est accordée à son tracé (Fig. 8).

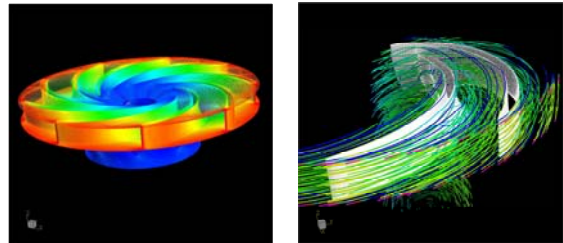


Figure 8 : Exemple de calcul CFX® dans une roue

Les calculs hydrauliques de la roue sont principalement effectués afin d'estimer les caractéristiques énergétiques en terme de débit, de chute et de pertes. Ces calculs permettent également de vérifier le comportement du tracé à la cavitation avec comme objectif de ne garantir aucune érosion dans tout le domaine de fonctionnement, en Pompe comme en Turbine.

De plus, et parmi l'ensemble des paramètres à maîtriser dans le tracé hydraulique, nous ne pouvons négliger le comportement vibratoire de la machine. C'est pourquoi l'étude des niveaux de fluctuation de pression présente également un sujet très important pour ALSTOM (Ref. 2 et 5). Grâce à un large programme de R&D initié il y a plusieurs années, les fluctuations de pression ont atteint, dans toutes les parties de la machine, de faibles niveaux. La maîtrise de ces niveaux permet d'augmenter la fiabilité de nos Turbines-Pompes.

Enfin, le meilleur moyen de vérifier et d'optimiser efficacement un tracé hydraulique est de le tester dans les conditions de fonctionnement pour lesquelles il a été développé. Nous testons donc toutes ces Turbines-

Pompes en réalisant des modèles réduits (Fig. 9) en homologie complète avec les machines industrielles installées sur site. Les tests de développement sur modèle réduit sont réalisés au sein du laboratoire d'ALSTOM, sur une plate forme d'essais spécifiquement dédiée aux Turbines-Pompes. Les niveaux de performances y sont mesurés avec la précision imposée par les normes internationales en vigueur.



En présence de représentants du client, les essais de réception sont également réalisés dans notre laboratoire ou, parfois, dans le laboratoire indépendant de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, en Suisse. Outre les très hauts niveaux de rendements obtenus en Pompe comme en Turbine, les essais démontrent également le très bon comportement de nos machines en terme de :

- Niveaux de fluctuation de pression,
- Cavitation,
- Stabilité lors des phases de démarrage en Pompe et de couplage en Turbine,
- Transitoires,
- Mécanique (poussées hydrauliques, ...)
- etc. ...

Cette méthodologie, qui associe à la fois l'utilisation de codes de calcul d'écoulement hydraulique (CFX®), de codes de calcul mécanique par éléments finis (ANSYS®) et les essais sur modèle réduit, permet d'obtenir des tracés hydrauliques dotés de très hauts niveaux de performance et de fiabilité, ceci, bien sûr, en respectant les spécificités de chaque projet.

Les alternateurs-moteurs (Fig. 10 et 11) sont caractérisés par une vitesse nominale relativement élevée. La machine doit être en outre dimensionnée pour la vitesse d'emballement (vitesse maximale que peut atteindre le groupe lorsque l'alternateur n'est pas relié au réseau et que les organes de coupure hydraulique (vannes) ne sont plus opérationnels), laquelle est généralement comprise entre 1.5 et 2 fois la vitesse nominale.

On comprend dès lors que les contraintes mécaniques à cette vitesse soient très élevées et que l'utilisation de matériaux de haute qualité soit rendue nécessaire. Des aciers jusqu'à 700 MPa de limite élastique peuvent être utilisés pour la réalisation des pôles saillants et la partie support de ces pôles communément appelée « la jante ». La jante est habituellement constituée par un empilage de tôles relativement fines (3 à 4 mm d'épaisseur). Ces tôles, serrées par des goujons traversants ont du fait de l'empilage et donc des joints entre tôles un coefficient d'utilisation bien inférieur à l'unité. Pour des contraintes plus sévères on peut être amené à utiliser des disques qui même avec une limite élastique inférieure ont un coefficient d'utilisation de 1. L'avantage des tôles est cependant multiple car en plus de la limite élastique élevée, les joints entre tôles permettent d'aménager des événements de ventilation à l'intérieur du rotor. L'avantage coût est lui aussi non négligeable.

Le rotor de la machine comprend en plus des pôles et de la jante, un centre rotor. Dans la mesure du possible, ce centre rotor sera constitué d'un arbre central sur lequel est fixée la jante. Mais bien souvent pour des puissances importantes il est nécessaire d'avoir un centre rotor de diamètre suffisant pour obtenir une inertie compatible avec une vitesse critique au delà de la vitesse d'emballement avec une marge de 15-20%. A la place de l'arbre forgé traditionnel, il est possible d'envisager un arbre en acier moulé de fort diamètre.

4. Caractéristiques des alternateurs-moteurs

celle-ci. L'absence de supports entre bobines (pour la tenue mécanique) par une conception originale de celles-ci, permet aussi de dégager de l'espace et de favoriser la circulation de l'air.



Figure 12 : Rotor d'Afourer URI (193 MVA – 750 tr/min)



Figure 13 : Vue de la forme particulière d'une bobine

Côté stator, les améliorations ont été faites sur plusieurs aspects :

- Utilisation de tôles de qualité supérieure pour le circuit magnétique (tôles 1W/kg à 50 Hz, 1 Tesla ou tôles à cristaux orientés).
- Technologie particulière permettant de réduire le mur isolant et par ce fait d'améliorer l'échange de chaleur entre le cuivre au stator et l'air passant dans les événements.
- Multiplication des événements de faible épaisseur permettant d'accroître la surface d'échange.

Si le refroidissement à l'air n'est pas possible techniquement, le refroidissement à l'eau (par passage d'eau désionisée dans les enroulements stator et rotor) permet de repousser les limites de faisabilité de ces machines.

Nous pouvons citer également d'autres aspects particuliers (Ref. 6) :

Le démarrage des alternateurs-moteurs, dans le sens moteur, se fait désormais à l'aide d'un CSF (Convertisseur Statique de Fréquence). La puissance de cet équipement est limitée par le dénoyage de la roue de la Turbine-Pompe pendant la phase de démarrage. Ce convertisseur permet en outre le freinage électrique en réinjectant sur le réseau la puissance mécanique pendant les phases d'arrêt.

Le freinage est complété par un freinage mécanique. Celui-ci est assuré par un disque situé au-dessus de l'alternateur. Ce disque et les pinces sont en dehors de l'enceinte même de l'alternateur, ce qui a pour effet de réduire la dispersion des poussières de freinage au sein même de la machine.

5. Apport de la vitesse variable

Pour la régulation des réseaux, les centrales de Pompage-Turbinage apportent une disponibilité et une fiabilité éprouvées. La dynamique du système est facilitée grâce à la rapidité des changements de charge ou de passage d'un mode à l'autre.

En plus de s'appuyer sur une énergie renouvelable, le développement de telles centrales est favorisé par la nécessité de maintenir un degré de qualité suffisant pour les réseaux.

La vitesse variable peut amener une plus grande réactivité grâce à la dynamique issue du convertisseur et à la possibilité d'échange d'énergie rapide lié au potentiel d'énergie cinétique entre deux niveaux de vitesse.

La vitesse variable (Ref. 7) permet en outre d'accroître la productibilité de la centrale, en permettant des fonctionnements au delà des plages possibles utilisées en vitesse fixe (problème de cavitation, marnage, etc...) et d'améliorer le rendement global du cycle pompage turbinage par l'amélioration des performances de la roue à différentes vitesses.

Pour une chute donnée, la vitesse variable permet également d'ajuster le débit, donc la puissance absorbée en mode pompe (ce qui n'est pas le cas en vitesse fixe).

La variation de vitesse autour d'une vitesse synchrone pour des questions hydrauliques reste relativement faible (5 à 10%). La solution économique pour l'alternateur-moteur est alors d'alimenter le rotor à pôles lisses par un convertisseur délivrant une fréquence faible correspondant à l'écart de fréquence entre fréquence du réseau et celle du rotor. La puissance et le coût du convertisseur en sont réduits d'autant.

6. Conclusion

Les centrales de Pompage-Turbinage, après la période naissante des années 1970, ont à nouveau un regain d'intérêt. Ce regain, lié à la nécessité de réguler les réseaux, est aussi lié étroitement aux solutions techniques innovantes et éprouvées qui ont été adoptées aux Turbines-Pompes et aux alternateurs-moteurs associés.

La technologie et la technique développées par ALSTOM permettent de reculer les limites de performances des Turbines-Pompes tout en leur assurant un haut niveau de fiabilité, élément incontournable pour l'exploitant des centrales et le gestionnaire de réseau dont il dépend directement.

Références :

Ref.1 : **“Single Stage reversible Pump/Turbine – From design to experience”**, by JB. Houdeline, S.Lavigne, P.Mora, M.Couston, M.François - Waterpower XIV, Austin (USA), 2005.

Ref.2 : **“Reversible Pump/Turbine and Motor-Generator Designs : A large Pumped Storage Power Plants Experience”**, by JB. Houdeline, T. Kunz, J. Brémond, S. Lavigne, P. Mora, P. Pépin, M. Couston, M. François, G. Vuillerod, J. Liu – The first International Conference on Hydropower Technology & Equipment 2006, Beijing (China), 2006.

Ref.3 : **“DERIAZ pump-turbine for the NAUSSAC 2 plant in France”**, by JB. Houdeline, JM. Verzeroli, J. Clerin – Hydropower & Dams, Gmunden (Austria), 1999.

Ref.4 : **“Double Stage Regulated and Reversible Pump/Turbines of YANGYANG power Station in KOREA”**, by JB. Houdeline, Y. Bouvet, D. Bazin, M. Couston, M. François, JM. Verzeroli – 23rd IAHR Symposium, Yokohama (Japan), 2006.

Ref.5 : **“Experimental and Numerical Study of Pressure Fluctuations in High Head Pump-**

Turbine”, by R.Blanc-Coquand, S.Lavigne, JL.Deniau, IAHR Charlotte (USA), 2000

Ref.6 : **“High rated generators-motors for pumped storage station”**, by M.Mazzocco (EdF) – G.Hémery & JM.Fermat (ABB ALSTOM POWER)- CIGRE, 2000

Ref.7 : **“Centrales Hydroelectriques et apport de la vitesse variable”**, par G.Hémery & J.Coulon (ABB ALSTOM POWER) – revue REE, 1999

-

Gérard HEMERY est ingénieur de l'Ecole Nationale d'Electricité et de Mécanique de NANCY (ENSEM). Est rentré à la société ALSTOM en 1974 dans le domaine des alternateurs hydrauliques. Est actuellement en charge des études des alternateurs hydrauliques et participe au programme de R&D sur ces produits.

Jean-Bernard HOUELINE, docteur de l'Université de Poitiers (Spécialité : Mécanique des fluides, 1991), entré à la société ALSTOM en 1990 dans le département des études hydrauliques. Ingénieur en charge du tracé hydraulique des Turbines-Pompes de 1990 à 1997 puis du développement du tracé hydraulique des Turbines Kaplan, Bulbe et Turbine-Pompe de 1997 à 2005. Est actuellement expert dans le tracé hydraulique des Turbines-Pompes.

Que mesure t-on avec un capteur de couple dynamique ?

Patrick BRUNET

Professeur de physique appliquée – BTS Electrotechnique

Lycée Benjamin Franklin - 21 bis rue Eugène Vignat – BP 72049 – 45010 Orléans cedex 01

patbrune@wanadoo.fr

Résumé : une des solutions retenues pour obtenir l'image du « couple disponible » sur un arbre moteur est de mettre en œuvre un barreau de torsion sur lequel on a collé des jauges de contrainte associé à un conditionneur. Avec un tel capteur est-il possible d'accéder au couple développé par une motorisation ? L'objectif de cet article est justement de préciser ce que l'on doit entendre par « couple disponible » en régime établi, mais surtout en régime variable. Dans ce cas, les inerties de part et d'autre du capteur doivent être prises en compte.



Couplémètres rotatifs - rotating torque sensor

- Axe/Clavette Ø19 des deux côtés - both shaft ends Ø19 with keyway
- Sortie câble - cable output

Type DR2269



Couple Nominal (C.N.) Nominal torque [Nm]	Vitesse max. ¹⁾ max speed [tr/min]	Raideur springrate [Nm/rad]	Charge latérale max. max. lateral load [N]	Moment d'inertie côté entraînant moment of inertia, drive side J en [kg m ²]	Poids weigh [kg]
10	2000	800	7,5	1x10 ⁻⁶	0,18
20	1500	1,5x10 ³	12	1x10 ⁻⁷	0,37
50	1500	3,8x10 ³	28	1x10 ⁻⁷	0,4
100	1500	5x10 ³	65	1,4x10 ⁻⁷	0,4

1. Relation fondamentale de la dynamique appliquée à un solide en rotation

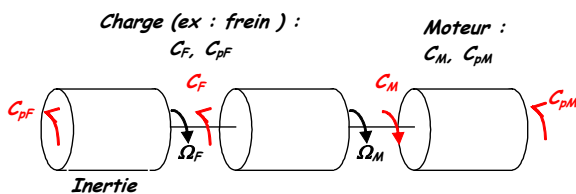


Figure 1

On considère habituellement que la ligne d'arbre est très rigide (on néglige le phénomène de torsion), ce qui fait que l'on ne prend en compte qu'une seule et même vitesse de rotation : Ω_M avec $\Omega_F = \Omega_M = \Omega$.

La relation fondamentale de la dynamique s'exprime alors par :

$$J_{\text{tot}} \frac{d\Omega}{dt} = C_M - C_F - C_{pM} - C_{pF}$$

avec J_{tot} : somme des moments d'inertie, C_{pM} : couple de perte côté moteur et C_{pF} : couple de perte côté frein.

Cette relation se simplifie en régime permanent et devient :

$$C_M = C_F + C_{pM} + C_{pF} \quad (0)$$

Mais cette vision est forcément simpliste car la transmission de couple à une charge ne peut se faire sans une déformation de l'arbre de rotation due à l'effet antagoniste du couple moteur et du couple frein. En régime permanent, cette déformation sera constante ce qui fait que les vitesses des deux arbres de rotation seront les mêmes. Ce ne sera pas le cas en régime transitoire en cas de démarrage par exemple.

On insère maintenant un capteur de couple dynamique sur la ligne d'arbre entre le moteur et sa charge. La partie sensible du capteur est un barreau de torsion sur lequel des jauges de contraintes ont été collées. La constante de rigidité en torsion K permet de relier le couple exercé entre les deux extrémités du capteur et l'angle de torsion : $C_{\text{tot}} = K(\theta_M - \theta_F)$.

A titre d'exemple le capteur SCAIME de calibre 100 N.m a une constante de rigidité en torsion de $5.10^3 \text{ N.m.rad}^{-1}$. Avec un couple de 100 N.m, on aura donc un angle de torsion de 0,02 rad soit $1,15^\circ$ au couple nominal. L'indication du capteur de couple est directement liée à cet angle de torsion qui déforme les jauges de contrainte. En régime permanent, l'angle de torsion est constant et les vitesses du moteur et du frein sont identiques. Ceci n'est plus vrai en régime transitoire.

Pour comprendre ce que mesure vraiment un capteur de couple, il est donc nécessaire de distinguer deux angles de rotation θ_M et θ_F et les deux vitesses de rotation Ω_M et Ω_F . L'indication du capteur de couple est alors l'image de l'écart angulaire $\theta_M - \theta_F$.

2. Insertion du capteur de couple sur une ligne d'arbre

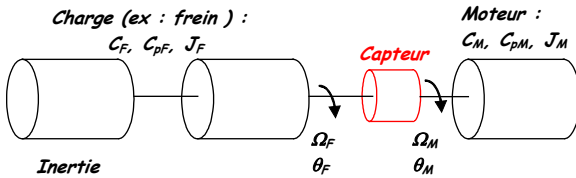


Figure 2

On suppose dans la suite que les autres liaisons sont rigides. On désigne par J_M le moment d'inertie total du côté moteur et J_F le moment d'inertie total du côté frein (le constructeur précise l'inertie côté entraînement pour le capteur).

On va maintenant appliquer le principe fondamental de la dynamique du côté moteur, puis du côté frein.

2.1. PFD côté moteur

$$J_M \frac{d\Omega_M}{dt} = C_M - C_{pM} - K(\theta_M - \theta_F)$$

$$= C_M - C_{\text{sec}M} - f_M \Omega_M - K(\theta_M - \theta_F)$$

avec $C_{pM} = C_{\text{sec}M} - f_M \Omega_M$ en supposant le couple de perte composé d'un frottement sec et d'un frottement fluide. Si on n'utilise que la variable angulaire, on a :

$$J_F \ddot{\theta}_M = C_M - C_{\text{sec}M} - f_M \dot{\theta}_M - K(\theta_M - \theta_F) \quad (1)$$

2.2. PFD côté frein

On obtient de même :

$$J_F \ddot{\theta}_F = -C_F - C_{\text{sec}F} - f_F \dot{\theta}_F + K(\theta_M - \theta_F) \quad (2)$$

en respectant les conventions de signe de couple indiquées sur la Figure 1.

On a donc 2 équations couplées avec les variables θ_M et θ_F .

3. Etude en régime établi à vitesse constante

Dans ce cas les dérivées premières des angles sont constantes et les dérivées secondes nulles (pas d'accélération). En faisant (1) + (2), on obtient :

$$C_M = C_F + C_{pM} + C_{pF} \quad (3)$$

ce qui est évidemment la même relation que (0) obtenue en régime permanent.

Mais on n'a pas de cette façon l'indication du capteur. Pour cela, il faut faire : (1) - (2)

$$C_M + C_F - C_{\text{sec}M} + C_{\text{sec}F} - f_M \Omega + f_F \Omega - 2K(\theta_M - \theta_F) = 0$$

où Ω représente la vitesse de rotation de l'arbre.

$$2K(\theta_M - \theta_F) = C_M + C_F - C_{\text{sec}M} + C_{\text{sec}F} - f_M \Omega + f_F \Omega$$

$$= C_M + C_F - C_{pM} + C_{pF}$$

En utilisant (3), il vient :

$$2K(\theta_M - \theta_F) = 2C_M - 2C_{pM}$$

$$D'où : K(\theta_M - \theta_F) = C_M - C_{pM} \quad (4)$$

Conclusion : en régime permanent, le capteur mesure le couple utile du moteur.

4. Etude en régime variable

On supposera pour simplifier que le frottement fluide est négligeable. Les équations deviennent :

$$J_M \ddot{\theta}_M = C_M - C_{\text{sec}M} - K(\theta_M - \theta_F) \quad (1)'$$

$$J_F \ddot{\theta}_F = -C_F - C_{\text{sec}F} + K(\theta_M - \theta_F) \quad (2)'$$

d'où :

$$\ddot{\theta}_M = \frac{C_M - C_{\text{sec}M}}{J_M} - \frac{K(\theta_M - \theta_F)}{J_M} \quad (1)''$$

$$\ddot{\theta}_F = \frac{-C_F - C_{\text{sec}F}}{J_F} + \frac{K(\theta_M - \theta_F)}{J_F} \quad (2)''$$

Posons $X = (\theta_M - \theta_F)$ et faisons (1)'' - (2)''

$$\ddot{X} + K \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_F} \right) X = \frac{C_M - C_{\text{sec}M}}{J_M} + \frac{C_F + C_{\text{sec}F}}{J_F}$$

La solution $X = (\theta_M - \theta_F)$ sera donc la somme d'un régime propre dû au 1^{er} membre de l'équation et d'un régime forcé par le 2^{ème} membre de cette même équation.

Compte tenu des hypothèses faites, le régime propre sera sinusoïdal non amorti de pulsation ω_0 telle que :

$$\omega_0 = \sqrt{K \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_F} \right)}$$

Ordres de grandeur :

- Cas d'un volant d'inertie placé du côté du frein
 $K = 5.10^3 \text{ N.m.rad}^{-1}$, $J_F = 0,2 \text{ kg.m}^2$, $J_M = 0,01 \text{ kg.m}^2$,
 $\omega_0 = 724,57 \text{ rad.s}^{-1}$ soit une fréquence de 115,32 Hz ou une période de $8,67.10^{-3} \text{ s}$.
- Cas d'un volant d'inertie placé du côté du frein et du moteur
 $K = 5.10^3 \text{ N.m.rad}^{-1}$, $J_F = 0,2 \text{ kg.m}^2$, $J_M = 0,2 \text{ kg.m}^2$,
 $\omega_0 = 223,61 \text{ rad.s}^{-1}$ soit une fréquence de 35,59 Hz ou une période de $28,09.10^{-3} \text{ s}$.

Le régime forcé, lui, sera bien sûr fonction du type de moteur utilisé et de la façon dont on le commande.

5. Démarrage d'un moteur à courant continu

Le banc testé a les caractéristiques suivantes :

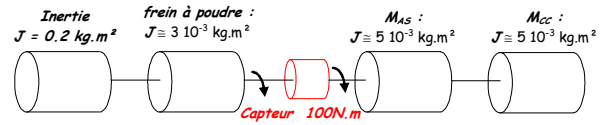


Figure 3

Le MAS n'est pas utilisé et la MCC est démarrée en direct sous 120 V (tension nominale 220 V).

La *fenêtre n°1* de la **figure 4** donne l'évolution du courant et du signal donné par le capteur de couple lors d'un démarrage à vide, tandis que la *fenêtre n°3* de la **figure 4** donne les mêmes grandeurs lors d'un démarrage freiné par le frein à poudre.

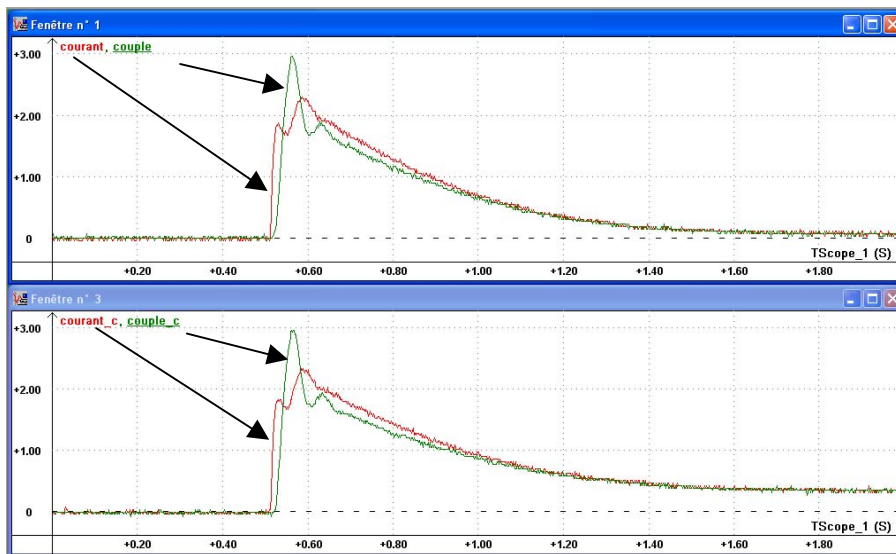


Figure 4

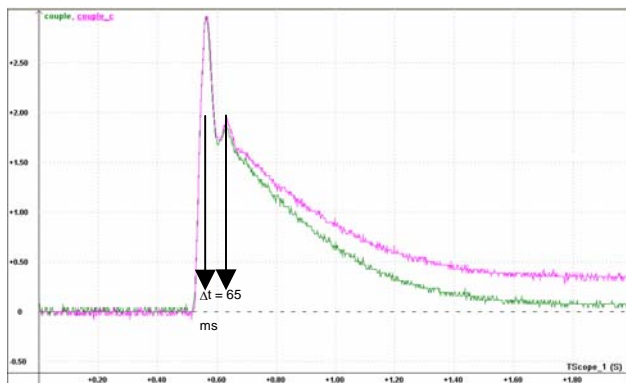


Figure 5

Comme on peut le constater sur la **figure 5**, les évolutions sont similaires si ce n'est le régime permanent puisque le couple de freinage est différent de zéro dans la *fenêtre n°3*.

On note une pseudo oscillation qui peut correspondre au régime oscillatoire précédent. Ce régime est très amorti contrairement aux hypothèses faites précédemment. La pseudo période est de 65 ms, donc plus longue que la période propre calculée théoriquement. Elle ne dépend pas du freinage, ce qui justifie qu'elle est d'origine mécanique. Le fait que la pseudo période mesurée soit beaucoup plus grande que la période calculée précédemment s'explique par le fait que le capteur est inséré entre le moteur et le frein par

l'intermédiaire de pièces d'accouplement. Il s'agit de pièces métalliques dentelées fixées directement sur les bouts d'arbre et reliées par un manchon caoutchouté. Il en résulte donc une élasticité qui est plus souple que si le capteur était relié de façon rigide. Tout se passe donc comme si la constante de raideur globale était plus faible que celle affichée par le constructeur. Ceci explique la valeur de la pseudo période plus élevée que prévue. Par ailleurs, le caoutchouc doit introduire une dissipation d'énergie entraînant un amortissement important.

Désaccouplement du volant d'inertie ; démarrage en charge

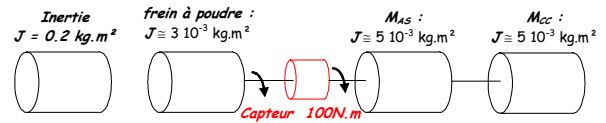


Figure 6

La fenêtre n°5 de la figure 7 donne les évolutions du courant et du signal donné par le capteur de couple lors d'un démarrage freiné après avoir désaccouplé le volant d'inertie. Le système est maintenant amorti et la phase de démarrage est plus courte. La modification de l'inertie a fait disparaître les oscillations.

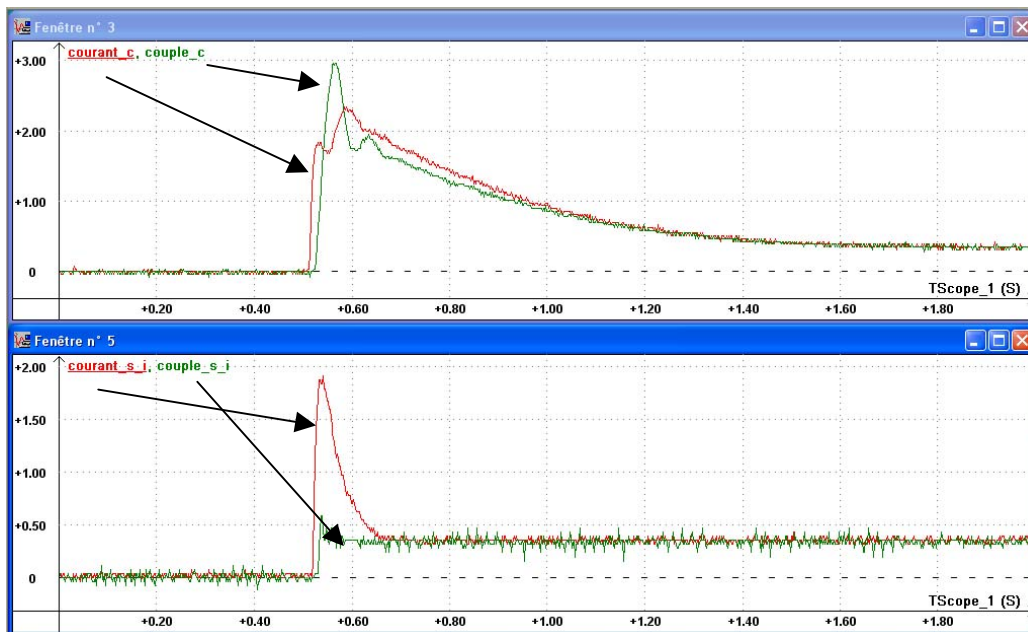


Figure 7

6. Démarrage d'un moteur asynchrone

6.1. Désaccouplement du volant d'inertie

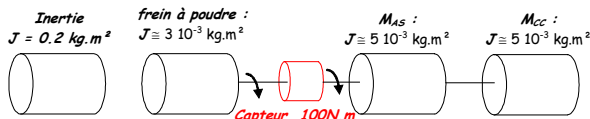


Figure 8

La MCC n'est pas utilisée ici et c'est maintenant le MAS qui est démarré sous une tension réduite de 170 V (tension nominale de 230 V). Le volant d'inertie est toujours désaccouplé. Le frein à poudre est activé.

On note (figure 9) le classique appel de courant lors du démarrage du MAS.

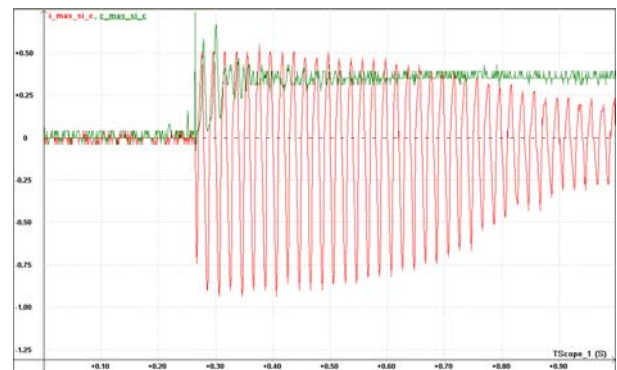


Figure 9

Le signal délivré par le capteur de couple est très oscillatoire et la période est la même que celle du courant au début de la phase de démarrage soit 20 ms. Cette période est celle du couple électromagnétique du

MAS lors de son démarrage. Elle est d'origine électrique.

6.2. Réaccouplement du volant d'inertie

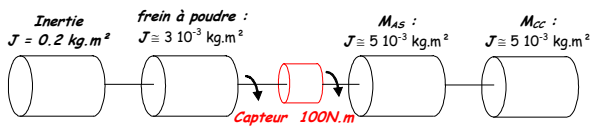


Figure 10

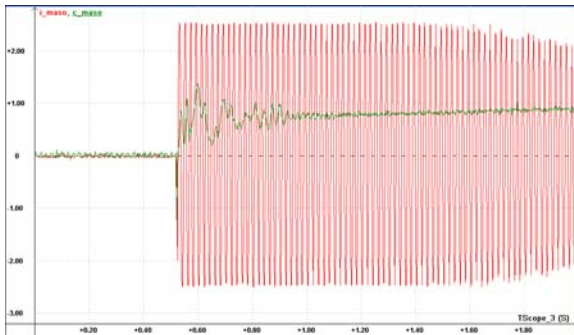


Figure 11

La phase de démarrage est maintenant très allongée (changement de la base de temps de l'oscilloscope) et la courbe de réponse du capteur est modifiée car il y a « *interférence* » entre les oscillations électriques du couple du MAS et les oscillations mécaniques dues à l'inertie.

7. Conclusion

En résumé, on retiendra que le capteur de couple donne le couple utile de la motorisation en régime établi. Lors d'un régime variable, la rigidité des liaisons entre les différentes parties mécaniques et les inerties viennent interférer avec le couple instantané développé par la motorisation.

Comprendre les harmoniques et leurs effets

Michel GUILLET, Jean-Claude GUIGNARD, Jean-Claude SCHUBENEL

Maîtres de conférences

Laboratoire d'Instrumentation Numérique et Analogique : LINA

I.U.T. 4 Bd Lavoisier BP 42018

49016 Angers

michel.guillet@univ-angers.fr

Résumé : Après une brève analyse des propriétés des principales charges déformantes connectées sur les réseaux BT et de leur influence sur la tension, cet article présente un rappel des notions théoriques liées aux harmoniques secteur et donne un aperçu des facteurs à l'origine d'une pollution harmonique. Les conséquences pour les matériels sont analysées. Les normes de CEM limitant cette distorsion dans les réseaux et les appareils sont évoquées. Des résultats de mesures sur différentes sources et différentes charges sont présentés, ainsi que l'influence de la distance à la source polluante. Enfin, il est montré que la pollution du réseau basse tension peut être engendrée par des charges de faible puissance (téléviseurs par exemple) en service simultanément et en grand nombre ; la journée du match France/Brésil de juillet 2006 constitue une excellente illustration.

1. Origines des harmoniques tension du réseau

Les harmoniques de courant dans les réseaux d'énergie basse tension (230 V, 50 Hz ou 120 V, 60 Hz) sont produits par des charges non linéaires, c'est-à-dire celles dont le courant consommé n'est pas sinusoïdal. Deux types de charges très répandus dans les réseaux BT sont susceptibles de produire des harmoniques de courant importants : les convertisseurs AC / DC avec redressement filtrage capacitif et les convertisseurs AC / AC de type gradateurs. Ces harmoniques de courant sont en grande partie responsables des harmoniques de la tension réseau.

Les perturbations harmoniques de la tension réseau ont trois origines : la source d'énergie, la distribution, les équipements. Source d'énergie, lorsque l'on considère la distorsion du réseau public ou d'un groupe électrogène. Distribution, lorsque l'on considère la distorsion du réseau à un endroit précis de ce réseau donc liée à l'éloignement de la source d'énergie. Équipements, lorsque l'on considère la distorsion du réseau induite par un type de charge : très, peu ou pas polluante.

Ces différentes sources de perturbation sont interdépendantes ; l'amplitude des phénomènes est alors liée à la puissance, à la localisation des charges perturbatrices et à la puissance de court-circuit du réseau.

Le bouclage des réseaux, favorable à l'obtention d'une puissance de court-circuit élevée, permet de limiter l'amplitude de ces phénomènes. A contrario, le débouclage des réseaux peut permettre d'isoler

une charge perturbatrice et donc de limiter les perturbations affectant d'autres installations [1].

2. Définitions et grandeurs caractéristiques

Toute fonction périodique peut être représentée par une somme de termes sinusoïdaux :

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n)$$

Y_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n.

L'indice 1 correspond au fondamental.

Le THD (Total Harmonic Distortion) ou taux global de distorsion :

$$THD(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1}$$

Taux individuel d'harmoniques :

$$Hn(\%) = 100 \frac{Y_n}{Y_1}$$

Le facteur de puissance est le rapport entre les puissances active P et apparente S :

$$F_p = \frac{P}{S}$$

Facteur de crête :

$$F_C = \frac{Y_{crête}}{Y_{eff}}$$

3. Illustration à travers un modèle

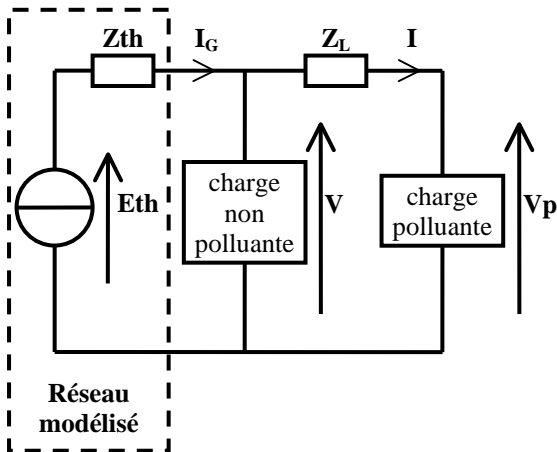


Figure 1 : Modèle d'un réseau :
Production - Distribution - Charges

La tension V représente la tension du réseau aux bornes duquel on souhaite brancher une charge quelconque (sensible ou non). Plusieurs facteurs influent sur le THD (Total Harmonic Distortion) de la tension V :

- En premier lieu, une partie de la pollution de la tension V provient de la pollution amont de la MT, via un transformateur MT/BT dont le couplage bloque l'harmonique 3 et ses multiples
- Ajouter une inductance aval Z_L ou diminuer l'impédance de source amont Z_{th} entraîne une diminution du THD de la tension V . Un réseau de campagne (Z_{th} élevée) peut être plus pollué qu'un réseau urbain ; pour la même raison, un groupe électrogène est plus pollueur que le réseau public
- Le THD de la tension V diminue avec l'éloignement de la charge polluante (augmentation de Z_L)
- Le THD de la tension V augmente avec l'accroissement du THD du courant réseau I_G , somme des courants des charges polluante et non polluante ; par exemple, en hiver, le chauffage non polluant (résistance pure) affaiblit le THD

4. Effets néfastes des harmoniques

4.1 Exemples de dysfonctionnements

Les harmoniques peuvent être à l'origine de diverses perturbations dans les réseaux et les appareils [2] :

- Dans une installation les condensateurs d'amélioration du $\cos\phi$ peuvent résonner à la fréquence d'un des premiers harmoniques, ce qui entraîne la disjonction de leurs protections voire leur destruction
- Les harmoniques de courant peuvent provoquer la surchauffe du fil neutre et des transformateurs

des installations triphasées, car la valeur efficace du courant dans le neutre peut atteindre $\sqrt{3}$ fois celle du courant de phase. Ainsi, à section égale, la puissance dissipée dans le fil neutre peut atteindre 3 fois celle d'un fil de phase. Ce problème est souvent aggravé dans les vieilles installations, du fait qu'en régime sinusoïdal, le neutre, qui ne conduit que le courant de déséquilibre des phases, a une section moitié de celle des fils de phase

- Les harmoniques de tension peuvent créer des couples oscillatoires dans les machines tournantes connectées directement au réseau ; ceci provoque vibrations, bruits acoustiques et ainsi accélère le vieillissement de celles-ci
- Le mauvais facteur de puissance des charges déformantes limite la puissance disponible dans les prises 16 A (2 kW au lieu de 3 kW en 230 V)
- Pour une puissance donnée, l'augmentation du courant efficace due à la diminution du facteur de puissance correspond à un accroissement des pertes en ligne
- Les harmoniques peuvent causer du bruit acoustique dans les ballasts des éclairages fluorescents
- Un équipement pollueur a un facteur de puissance faible (inférieur à 0,7) ce qui entraîne une forte déqualification de certains matériels comme les transformateurs
- Certains dispositifs de protection (disjoncteurs, fusibles) peuvent se déclencher intempestivement
- Sur de longues distances, les lignes de télécommunication peuvent être perturbées par couplage avec les harmoniques des lignes de transport d'énergie voisines
- Des mesures peuvent être faussées en particulier avec les compteurs d'énergie et les appareils « non efficace vrai ».

5. Normes et recommandations

L'électricité est maintenant considérée comme un produit. Pour le réseau public basse tension, la norme EN50160 définit ses caractéristiques principales au point de livraison du client. Outre cette norme européenne, le niveau maximum des divers rangs harmoniques est défini par les normes de CEM : CEI 61000.

Les normes font référence à différents niveaux de perturbation définis ci-dessous :

- **Niveau d'émission** : maximum autorisé sur le réseau public pour un utilisateur ou un appareil
- **Niveau de compatibilité** : niveau maximum de perturbation spécifié auquel on peut s'attendre dans un environnement donné
- **Niveau d'immunité** : niveau de perturbation supporté par un matériel ou un système
- **Niveau de susceptibilité** : niveau à partir duquel il y a dysfonctionnement d'un matériel ou d'un système.

Afin d'éviter d'atteindre ces niveaux, il faut fixer des limites aux perturbations émises par les équipements pris isolément. Ce **niveau d'émission**, en BT, est précisé dans les normes CEI61000-3-2 et CEI61000-3-4 respectivement pour les appareils absorbant un courant inférieur ou supérieur à 16 A.

Pour garantir un bon fonctionnement des appareils il est nécessaire que ceux-ci puissent supporter des niveaux de perturbation supérieurs au **niveau de compatibilité**. Dans le cas où ceux-ci seraient dépassés, ce qui est admis de façon transitoire, l'appareil doit supporter le **niveau d'immunité** [3].

Taux (en %) des tensions harmoniques acceptables en niveau de compatibilité CEI61000-2-2	
Rang harmonique	Réseaux publics et industriels
2	2
3	5
4	1
5	6
6	0,5
7	5
8	0,5
9	1,5
10	0,5
11	3,5
12	0,2
13	3
THD	8 %

6. Amélioration de la qualité d'un réseau

Les solutions sont fonction du but recherché et des pollueurs / pollués en présence. Dans la plupart des cas l'objectif est de diminuer le taux de distorsion en tension, au niveau d'un point de raccordement de plusieurs charges (tableau de distribution). Les solutions visent à dépolluer au niveau des appareils pollueurs (dépollution à la source) ou au niveau du réseau (dépollution amont) [4].

6.1 Séparation des charges perturbantes

- Pour les charges polluantes de forte puissance : alimentation par une ligne séparée partant directement du transformateur ou par un autre transformateur MT/BT couplé primaire triangle ou étoile sans neutre et secondaire ZIG-ZAG ou étoile avec neutre. Dans ce cas, les courants harmoniques de rang multiple de 3 ne circulent pas au primaire.
- Séparation entre les circuits comportant des charges perturbantes et les autres, au niveau le plus haut possible de l'installation BT, ce qui permet de bénéficier de l'affaiblissement des perturbations par l'impédance des câbles (Fig 2)

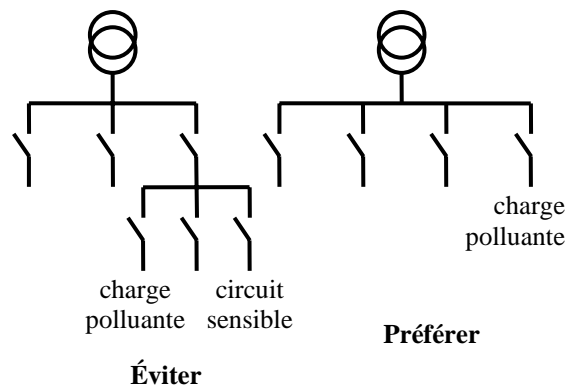


Figure 2 : séparation des charges polluantes

6.2 Systèmes passifs de protection

Le filtrage des harmoniques de courant au niveau du réseau convient pour les installations de quelques dizaines de kVA. Le filtre est constitué d'un condensateur en série avec une inductance, accordé sur chaque fréquence harmonique à éliminer. L'ensemble est placé en dérivation sur l'installation. Le filtre ne doit pas entraîner de résonance parasite avec les inductances du réseau sur d'autres fréquences.

6.3 Filtrage actif

Il consiste à filtrer les harmoniques de courant au niveau du réseau. Cette solution convient pour les installations jusqu'à quelques centaines de kVA. Un convertisseur statique « propre » de type AC/AC avec une commande appropriée compense les déformations de la tension du réseau en fournissant l'énergie déformante nécessaire.

6.4 Correcteur de Facteur de Puissance (P.F.C.)

Placé à l'entrée des appareils, un convertisseur AC/DC spécifique dépollue la source en supprimant les harmoniques de courant dans le réseau. Le plus souvent, il s'agit d'un convertisseur à découpage de type élévateur, dont la commande est étudiée pour consommer un courant sinusoïdal en phase avec la tension. Ainsi, vu du réseau, l'appareil est non pollueur et non consommateur d'énergie réactive [5].

7. Illustration

Cette partie entièrement expérimentale, illustre les harmoniques dans différents contextes, différents réseaux et différents pollueurs (en particulier les téléviseurs). L'influence de l'impédance de la distribution (distance à la source) et celle de la puissance du pollueur sont mises en évidence.

7.1 Observation de la tension réseau

Essai réalisé avec une charge polluante type convertisseur AC/DC connectée à une prise standard 16 A.

Puissance active absorbée au réseau	1150 W
Facteur de puissance	0,74
Tension efficace réseau chargé	225 V
Courant efficace réseau	7 A
V_{THD} avec la charge polluante	6 %
V_{THD} sans la charge polluante	2 %

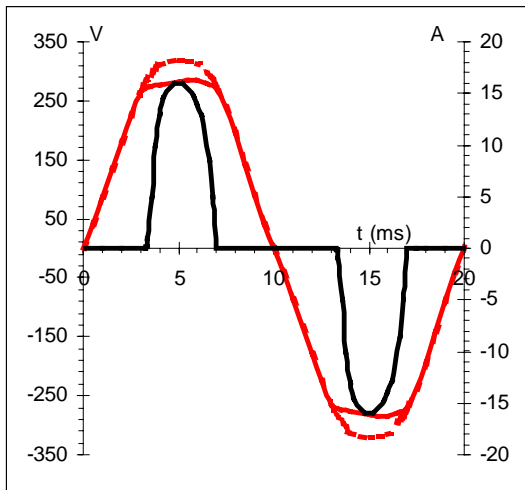


Figure 3 : Courant dans la charge polluante et incidence sur la tension réseau : V_{THD} 6 et 2 %

Les deux courbes de tension montrent la forme de la chute de la tension réseau et la distorsion induite par le convertisseur AC/DC.

7.2 Présentation de différents types de pollueurs

Les charges choisies ont la même puissance active : 500 W. Elles sont branchées sur le même réseau public et les mesures ont été faites dans un laps de temps de quelques dizaines de minutes.

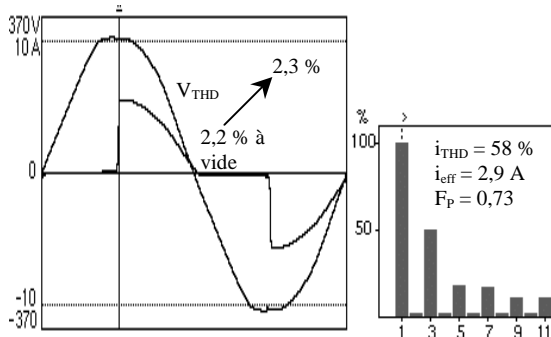


Figure 4 : Éclairage avec variateur de lumière : courant et tension réseau ; spectre harmonique courant

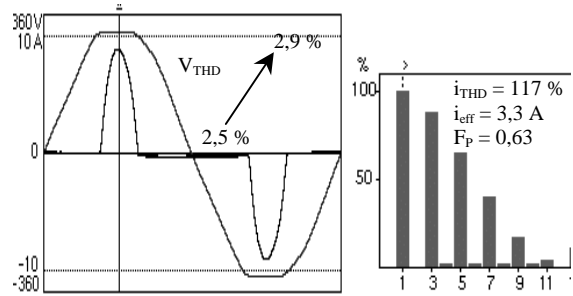


Figure 5 : Convertisseur AC/DC : courant et tension réseau ; spectre harmonique courant

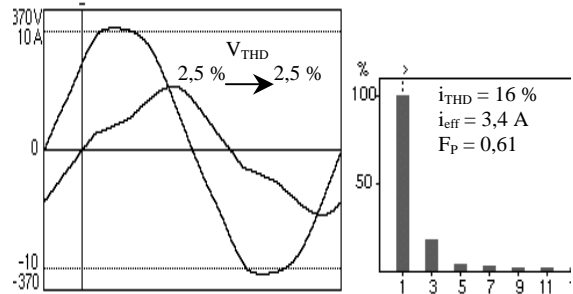


Figure 6 : Éclairage néon : courant et tension réseau, spectre harmonique du courant

Commentaires :

- À puissance égale, le plus gros pollueur est le convertisseur AC/DC avec une augmentation de 15 % du V_{THD} contre 5 % pour le variateur de lumière et aucune pour l'éclairage néon.
- Ces résultats corroborent les mesures de la distorsion de courant : sur le même réseau, plus le courant est riche en harmoniques plus la perturbation induite sur la tension est importante.
- La charge « éclairage avec variateur », malgré son front de courant, reste peu polluante ; de plus ce danger harmonique est minimisé par l'effet cumulatif de charges identiques, dans la mesure où les fronts de courant apparaissent à des instants différents.
- Si l'éclairage néon n'est pas à proprement parler une charge polluante, il est fortement consommateur d'énergie réactive.

7.3 Influence de l'éloignement et de la puissance du pollueur

La charge choisie est un convertisseur AC/DC à puissance variable. Cette charge polluante est reliée au réseau par une rallonge de 40 m simulant l'éloignement. À 50 Hz, l'impédance de cette rallonge est : $Z_L = 2,3 + j,0,01$ (34μH). Pour différentes puissances actives, on mesure le THD des deux tensions : V_p aux bornes du pollueur et V aux bornes du réseau (Fig1).

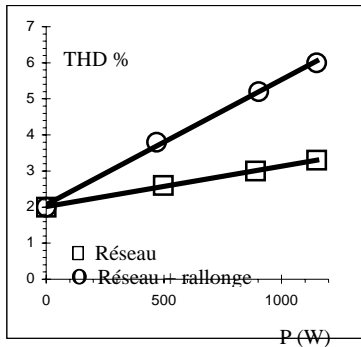


Figure 7 : Influence de l'éloignement et de la puissance

- Le THD augmente quasi linéairement avec la puissance du pollueur.
- En s'éloignant de 40 m du pollueur on a divisé par deux le taux de distorsion. Ainsi, grâce au maillage d'une installation, l'atténuation de cette distorsion est « géographiquement » significative à l'échelle de quelques dizaines de mètres.
- En fonction de la distance, le même pollueur, à la même puissance, n'induit pas le même THD de la tension. La mesure de la distorsion harmonique du courant consommé par un équipement doit donc être réalisée à partir d'une source de tension spécifiée avec un THD à vide maximum spécifié, par exemple : $Z_{th} = 0,4 + j,0,25$ (800 μ H) à 50 Hz et V_{THD} à vide inférieur à 2%.

7.4 Influence de la source d'énergie

La figure 8 ci-dessous montre la tension de sortie d'un groupe électrogène à vide et chargé par un convertisseur AC/DC de 500 W.

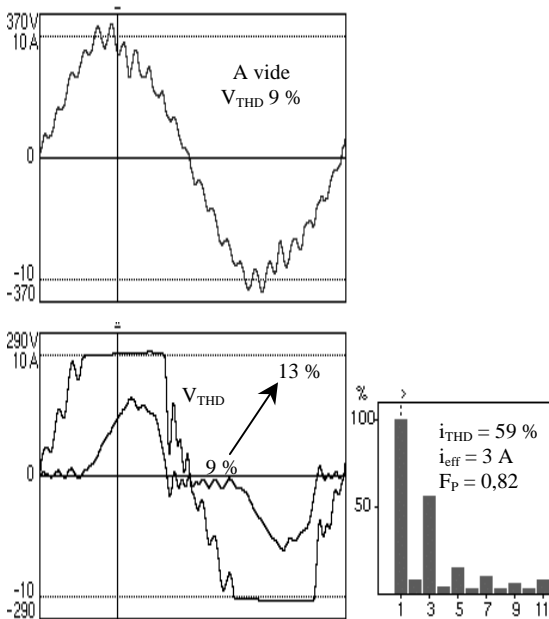


Figure 8 : Groupe électrogène GAM 145 Leroy-Somer 2 kVA, à vide et en charge

Ce résultat, obtenu avec un groupe électrogène, est à comparer avec la même mesure effectuée à partir du réseau public (Fig 5). Il apparaît que le groupe électrogène est lui-même pollueur avec 9 % de THD de tension à vide ; cependant, à cause de la forte impédance interne de celui-ci, le courant débité est moins riche en harmoniques ($i_{THD} = 59$ % contre 117 %) ce qui améliore nettement le facteur de puissance et diminue ainsi le courant efficace en ligne.

Reste à imaginer le comportement d'une charge plus ou moins sensible branchée sur la tension ayant 13 % de THD (Fig 8).

7.5 Effet cumulé des distorsions

Pour avoir une vue globale de la distorsion du réseau, il est important de prendre en compte la diversité des facteurs influents. La figure 9 montre un exemple d'évolution de cette distorsion observée au cours d'une journée d'été dans un quartier résidentiel.

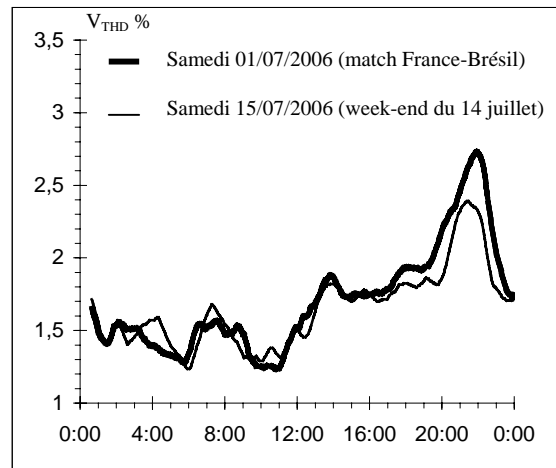


Figure 9 : Evolution journalière du THD tension réseau

La nuit la distorsion est assez faible, elle augmente à partir de 12 h, comporte une première pointe en tout début d'après midi puis croît de nouveau de 17 h à 20 h. La pointe maximum entre 20 h et 24 h est due aux téléviseurs.

Le match France-Brésil commence à 21 h avec 22 millions de téléviseurs, comparativement à un deuxième samedi week-end du 14 juillet où le nombre de téléviseurs en fonctionnement est notablement plus faible.

Vu du réseau, un téléviseur est un convertisseur AC/DC d'environ 80 W ; seul il n'est pas pollueur. Cependant, à certaines heures, la superposition d'un nombre élevé de petites charges polluantes (téléviseurs, ordinateurs, chargeurs...) peut entraîner une hausse sensible du THD qui peut alors atteindre la MT et se propager par le réseau.

8. Autres charges potentiellement polluantes

Dans les domaines grand public et domestique le chauffage à induction a tendance à remplacer les résistances. Ce type d'appareil comporte également à l'entrée un convertisseur AC/DC.

Par ailleurs, en ce qui concerne la climatisation, la recherche d'optimisation du rendement thermique par l'utilisation de compresseurs à vitesse variable ajoutera un grand nombre de sources puissantes de pollution. En outre, à terme, si aucune précaution n'est prise, la charge des batteries des véhicules électriques ajoutera une très importante pollution harmonique.

9. Conclusion

La perturbation harmonique constitue une des nombreuses sources de perturbation du réseau. Son impact prend de plus en plus d'importance.

Nous avons mis en évidence les principales causes de cette perturbation, et identifié certains facteurs qui permettent d'agir sur celle-ci, afin d'améliorer la qualité du courant absorbé par les équipements.

D'une manière générale, les réponses aux problèmes associés à la perturbation harmonique ne sont pas identiques dans le monde industriel et dans le domaine grand public.

Dans l'industrie, l'un des objectifs principaux consiste à maîtriser les coûts de fabrication/production et, en particulier celui de l'énergie. La solution consiste souvent à utiliser des variateurs [6] ou tout autre dispositif électronique en général polluant.

L'utilisation de ces matériels a pour conséquence un fort déclassement de certains équipements comme les transformateurs. La nécessité de dépollution devient alors indispensable, tout ceci dans un cadre normatif débouchant parfois sur des contrats avec les fournisseurs d'énergie, par exemple le contrat « Émeraude » d'EDF.

Dans le domaine grand public, un nombre élevé, et sans cesse croissant de petites charges fonctionnant simultanément et pour des durées significatives, engendre une pollution symptomatique du réseau ; le remède est alors essentiellement normatif.

La norme EN 61000-3-2 applicable depuis 1996, limite les courants harmoniques concernant les téléviseurs, les ordinateurs et les écrans d'une puissance nominale supérieure à 75 W. Dans le futur, si l'efficacité de cette norme s'avérait insuffisante, il serait envisageable d'abaisser le seuil de puissance par exemple à 50 W.

Bibliographie

- [1] : M.-A. MASSIN
« Tension, Flicker, Transitoires, Harmoniques... Restons au courant »
Revue Mesures N°730 décembre 2000
- [2] : J.-C. GUIGNARD
« Line harmonics : origin, evolution and limitation »
PCIM/ Power Quality Proceedings 26-28 May 1998
Nuremberg
- [3] : J.-C. GUIGNARD
« Les harmoniques : application des normes de CEM associées »
Revue de l'électricité et de l'électronique, REE N°5
mai 1999
- [4] : E. BETTEGA et J.-N.FIORINA
« Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs »
Cahier Technique Schneider n° 183
- [5] : R. REDL
« An economical single-phase passive Power-Factor-Corrector Rectifier : Topology, Operation, Extensions and design for compliance »
APEC 1998 Proceedings pp. 454-460F.
- [6] : POULET
« Empêchez vos variateurs de vitesse de polluer le réseau » Mesures 736 juin 2001

CAPTEURS INDUSTRIELS, MESURES DE DEBITS, NIVEAUX ET TEMPERATURES

Patrick QUIRIN

Lycée Louis VINCENT

57000 METZ

Patrick.Quirin@ac-nancy-metz.fr

Résumé : A la suite d'une présentation du BTS CIRA (contrôle et régulation) l'article dresse un éventail des capteurs industriels les plus utilisés actuellement dans le cadre de mesures de débits, de niveaux et de températures. Les principes de fonctionnement sont évoqués La transmission des signaux passe de l'analogique au tout numérique via les bus de terrain. L'article évoque les contraintes liées aux nouvelles normes ATEX

I. FONCTIONS OCCUPEES PAR LE TECHNICIEN CIRA

Le technicien supérieur CIRA (Contrôle Industriel et Régulation Automatique) est un spécialiste des **procédés et systèmes automatisés** mis en œuvre en chimie, pétrochimie, métallurgie, agroalimentaire, verreries, cimenteries, papeteries, production et gestion d'énergie, traitement des eaux usées, des unités de production industrielles.

Rappelons qu'un automatisme comprend **des capteurs** qui renseignent sur l'état du **système à contrôler**, et un **dispositif de commande** qui traite **les informations reçues** et envoie des **instructions** aux **actionneurs**.

La **régulation** regroupe l'ensemble des techniques visant à **contrôler** une grandeur physique générée par un **système soumis à des perturbations**.

Les compétences acquises permettent d'exercer les fonctions suivantes :

Etudes : concevoir la partie contrôle commande d'une installation industrielle, réalisation d'une supervision

Contrôle : procéder en laboratoire à l'étalonnage des appareils de mesure et de commande, réglage sur site, définir les procédures de vérification.

Maintenance : Définir les procédures d'intervention, établir un planning des travaux.

Mise en œuvre et conduite d'une installation : démarrer une unité de production, rechercher son fonctionnement optimal et proposer les modifications éventuelles.

Assistance technique et animation d'équipe : organiser la documentation technique, assurer des actions de formation.

Au cours de sa formation le technicien CIRA suit un stage en milieu industriel d'une durée de 14 semaines. Il s'agit d'un point fort de cette formation qui permet un rapprochement avec le monde industriel tant pour les étudiants que pour les enseignants.

II. TRANSMISSION DES SIGNAUX

La transmission des informations mesurées sur un site industriel doit permettre d'informer du comportement de ce procédé. La grandeur physique : une pression, une force un déplacement, une vitesse ou une tension (entre autres ...) sera mesurée par un capteur, puis convertie, pour être transmise aux standards usuels.

II.1. Transmission 4-20mA « classique »

Le standard le plus utilisé actuellement pour la transmission des signaux analogiques est un signal en courant variant de 4 à 20mA. Le 4-20mA classique est utilisé par 50,4%¹ des transmetteurs. Les principaux arguments avancés à son utilisation sont les suivants ; Il s'agit d'un courant faible, en boucle de courant pas de perte d'information par rapport à un signal en tension, détection de rupture de boucle par différenciation du 0mA et du 4mA.

Le capteur sommairement et usuellement appelé ainsi est en réalité constitué d'un capteur, d'un convertisseur et d'un transmetteur. Ce capteur nécessite des réglages, et des ajustements d'échelle. Une intervention sur site est souvent nécessaire.

¹ Résultat d'un sondage effectué en 2002 par la revue « Mesures »

II.2. Communication de type HART

Une amélioration du capteur apparaît dans les années 1980, il s'agit du capteur dit **intelligent**. Le capteur possède alors une mémoire EEPROM et peut communiquer numériquement. Le signal standard 4-20mA est maintenu. La boucle reste analogique et sert de support à la communication numérique et ce sans perturber le signal du procédé. Ce système est compatible avec les solutions existantes, il permet la maintenance et le diagnostic par l'intermédiaire d'une supervision centralisée.

Le principe de **communication** exploite la **modulation de fréquence** sur le standard Bell 202. Il s'agit là du protocole **HART (Highway Adressable Remote Transducer)**. La technique HART (marque déposée par la société Rosemount actuellement nommée Emerson) est largement standardisée et permet de communiquer avec les appareils de nombreux fabricants.

La communication est réalisée en superposant au signal 4-20mA un signal sinusoïdal d'amplitude $\pm 0,5\text{mA}$. Deux fréquences, 1200Hz et 2200Hz correspondent respectivement aux digits 1 et 0. La valeur moyenne de l'onde sinusoïdale est nulle donc aucune perturbation n'est additionnée au signal du procédé. 36,3%² des transmetteurs sont de type 4-20mA avec protocole HART et environ 50% des entreprises la mettent en œuvre.

II.3. Communication par liaison numérique

La solution numérique avec **bus de terrain**, donc des capteurs totalement numériques, s'impose à 8,7%. Par bus de terrain on entend les moyens de communication informatiques sur un site industriel.

La tendance actuelle est au tout numérique avec bus de terrain. Les différents constructeurs ont du mal à s'entendre afin de créer un bus de terrain répondant à des standards communs. En 1994 une première tentative d'harmonisation voit le jour : Worldfip (World Factory Information Protocol, Europe et ISP (Interoperable System Project, USA) fusionnent pour donner Fieldbus Foundation. De nombreux intérêts divergents empêchent ce standard de s'imposer. D'ailleurs aucun standard international n'y réussit totalement. Cependant **Profibus** est le standard que l'on trouve majoritairement du capteur au contrôle process. On trouvera le bus **Ethernet** du contrôle process au contrôle de l'usine.

Les fonctionnalités offertes par les techniques numériques sont loin d'être exploitées à leur maximum. Quand les industriels les exploitent, ils ne les appliquent pas à tout leur parc. La fonction diagnostic continu, la plus usitée, permet la mise en place d'une maintenance prédictive. La possibilité de paramétrage à distance surtout utilisée pour la mise en service l'est plus fréquemment par certaines industries,

par exemple lors de changements de recettes de fabrication.

Les contraintes administrative et technique d'un opérateur présent en zone dangereuse rendent intéressante la possibilité d'intervention à distance.

III. MESURES DE DEBIT

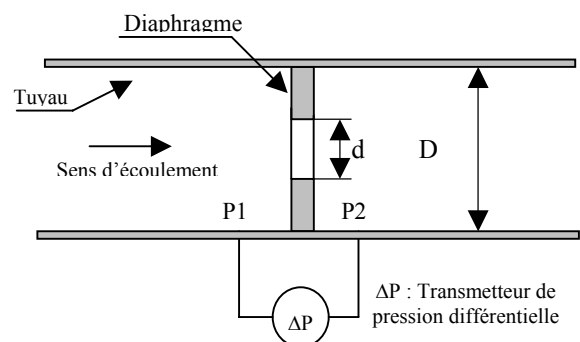
La diversité des technologies et des principes de mesures répond à la diversité des applications industrielles. Chaque principe de mesure possède son champ d'application. Une technologie nouvelle ne s'imposera que si elle est apte à permettre une diminution des coûts d'exploitation ou une augmentation des performances. La marge de manœuvre est d'autant plus restreinte que l'industriel ne peut se permettre de servir de plate forme d'essais. Les contraintes économiques brident la curiosité.

Deux technologies s'imposent pour 76% des mesures de débits. Il s'agit des **débitmètres à organes déprimogènes** (61% des mesures) utilisés principalement dans les secteurs de la chimie du pétrole et gaz et de l'eau et les **débitmètres électromagnétiques** (15% des mesures) utilisés essentiellement dans le secteur agroalimentaire de l'électricité et de l'eau.

Les **débitmètres Coriolis** (8,8%) et à **ultrasons** (2,6%) actuellement en pleine phase de développement, se partagent le reste du marché avec les **débitmètres à effet vortex** (6,2%) et à **turbine** (5%).

III.1. Indications concernant le débitmètre à diaphragme

Technique employée depuis plus de 80 ans. Un disque percé d'un trou est placé dans une canalisation. Cette perturbation crée une pression différentielle de part et d'autre du diaphragme



En appliquant le théorème de Bernoulli

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + P + \rho gh = cste$$

qui exprime la relation entre vitesse et pression ou variation de vitesse et perte de charge lors d'un

² Open cit.

changement de section on en déduira que

$$Q = K \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

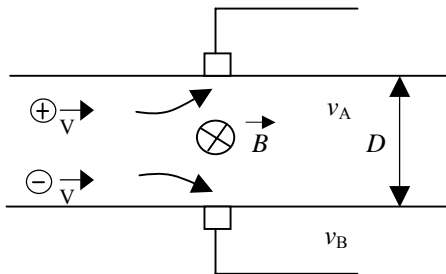
K tient compte de la géométrie du diaphragme, de d et D suivant la norme ISO 5167-1.

La mesure de ΔP , pression différentielle sera exploitée par un transmetteur de pression qui à pour fonction de linéariser le signal (présence d'un terme en racine carrée) et de convertir cette grandeur physique au standard 4-20mA.

Ce principe de mesure est adapté pour les mesures de liquides, gaz et vapeurs. Peu coûteux, il ne comporte pas de pièces d'usure mais il est peu adapté aux fluides chargés en particules enclins à obstruer les canalisations de mesures et à s'accumuler auprès du diaphragme.

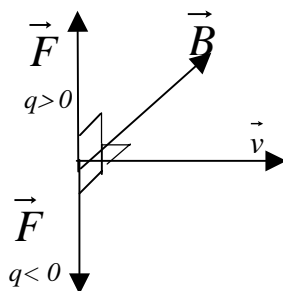
III.2. Indications concernant le débitmètre électromagnétique

Le liquide conducteur dont on mesure le débit est une solution ionique, donc présence d'ions + et ions - animés d'une vitesse moyenne dans le sens du tuyau. B est un champ magnétique uniforme perpendiculaire au tuyau de diamètre D. Des électrodes sont disposées en vis-à-vis perpendiculairement au champ magnétique.



v = vitesse moyenne des ions avec $Q_v = v \cdot S$
 S = section du tuyau

Le champ magnétique exerce une force sur la charge q
 $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$



Il en résulte une accumulation de charges + et - de chaque coté du tuyau et donc la création d'un champ électrique \vec{E} :

$$E = \frac{v_A - v_B}{D}$$

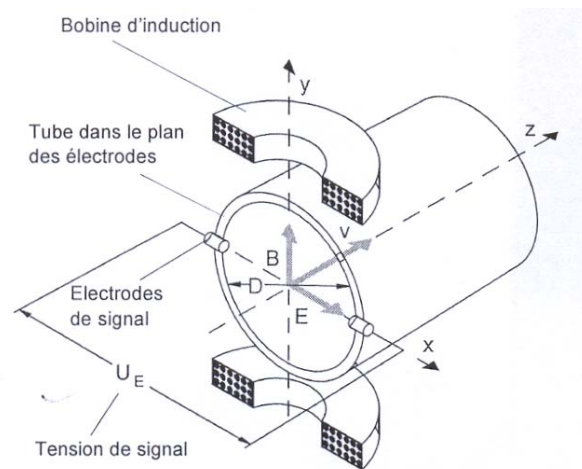
Une charge positive par exemple est donc en équilibre sous l'effet de 2 forces (poids négligeable)

$$\vec{F} \text{ magnétique ; } F_m = qvB$$

$$\vec{F} \text{ électrique ; } F_e = qE = q \frac{v_A - v_B}{D}$$

$$F_m = F_e \text{ donc } qvB = q \frac{v_A - v_B}{D}$$

puis $v_A - v_B = BDv = U_E$



- U_E = Tension de signal
- B = Induction magnétique
- D = Espacement des électrodes
- v = Vitesse moyenne de débit
- q_v = Débit volumique

$$U_E \cdot B \cdot D \cdot v$$

$$q_v = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot v$$

$$U_E \sim q_v$$

Schéma de principe document ABB

Le **fluide** dont on mesure le débit doit être suffisamment **conducteur** (conductivité supérieure à $1\mu S/cm$), il s'agit de la contrainte principale du débitmètre électromagnétique. Ce qui exclut les produits pétroliers, les gaz, en fait tous les fluides non-conducteurs. En leur faveur on avancera que ces appareils n'engendrent pas de pertes de charges. La cellule de mesure n'est en fait qu'un tube où l'on trouve deux électrodes. Ce débitmètre est particulièrement bien adapté à l'industrie alimentaire et l'industrie de l'eau.

III.3. Critères de choix d'un capteur

Une stabilité sur 5 ans sera plus appréciée qu'une précision à 0,5%, sauf pour les applications de transactions commerciales. Dans ce domaine les organismes de validation préfèrent les compteurs volumétriques ou à turbine, considérés moins falsifiables que l'électronique. La technologie étant au point, on en parle moins. La différence sur le choix d'un appareil se fera sur la prestation de service.

IV. MESURE DE NIVEAU

Le marché industriel de la mesure de niveau fait appel à de nombreuses technologies. La grandeur physique exploitée est soit une distance, un temps, une pression, une masse ou une capacité. Cependant trois principes tendent à se démarquer actuellement, les mesures par pression (30% des mesures), ultra sons (10% des mesures) et radar (9% des mesures). Pour les liquides, elles représentent environ 80% du marché. Les capteurs mécaniques sont en pertes de vitesse bien que très présents sur le marché (40% des mesures).

IV.1. Indications concernant la mesure de niveau par capteur de pression

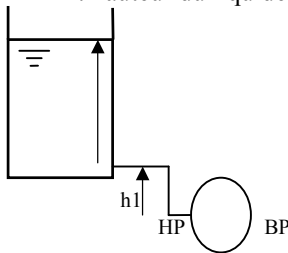
La mesure de niveau par mesure de pression hydrostatique est basée sur le principe de Pascal.

$P = \rho gh$ P : Pression en Pa

ρ : masse volumique (kg/m^3)

g : accélération de la pesanteur (m/s^2)

h : hauteur du liquide (m)



Cette mesure implique que ρ soit constant. L'appareil qui mesure la pression est un **transmetteur de pression différentielle**, il mesure en fait une différence de pression (ΔP) entre HP (haute pression) et BP (basse pression). Dans le cas de cette figure BP est à la pression atmosphérique. D'autre part si cet appareil est placé plus bas que le niveau 0 il convient d'en tenir compte.

Soit $\Delta P = HP - BP$

$$HP = \rho g(h+h_1) + P_{atm} \quad BP = P_{atm}$$

Le transmetteur devra être étalonné en fonction de la mesure à réaliser

Cette technique de mesure, précise si les masses volumiques ne varient pas, est peu influencée par les mousses et les vagues et offre une étendue de mesure allant de quelques centimètres à plusieurs mètres. C'est la technique de mesure de niveau la plus utilisée actuellement.

Les transmetteurs de pression différentielle utilisés pour les mesures de niveaux sont largement exploités pour les mesures de **pression relatives et absolues**. On retrouve ces appareils pour les mesures de débit à diaphragme.

IV.2. Mesure de niveau par capteur à ultrasons

Un émetteur envoie une onde sonore ou ultrasonore (10 à 40 kHz) qui est réfléchiée par les surfaces solides, mais aussi par les surfaces liquides. Un récepteur capte cette onde. L'intervalle de temps entre l'émission et la réception est mesuré. Le son se propage à une vitesse de 331 m/s dans l'air à 0°C. La distance est alors déduite.

Les ondes peuvent être ralenties par la présence de molécules gazeuses, de mousse ou de poussière. La température est un facteur influent : une élévation de température de 1°C augmente la vitesse de propagation du son dans l'air de 0,6 m/s

Les capteurs, bien que munis de compensation en température, ne mesurent pas la température du milieu traversé par l'onde.

Cette technologie non intrusive (pas de contact avec la matière) garde une part de marché importante du fait d'un coût faible, de sa facilité d'installation et de sa fiabilité.

IV.3. Mesure de niveau par radar.

Cette mesure de niveau, apparue depuis quelques années seulement, est en forte progression. Elle est basée sur le même principe que la précédente, la différence se situant au niveau du type d'onde émise et détectée en écho. Au lieu d'une onde sonore ou ultrasonore, le radar utilise une onde électromagnétique haute fréquence (de 5 à 50 GHz). Le signal d'émission est envoyé modulé, la fréquence de l'écho est légèrement différente de celle du nouveau signal émis. La différence de fréquence est proportionnelle à la distance entre l'émetteur et le liquide.

Pour un coût certes plus élevé ce principe efface nombre d'inconvénients du précédent, mais le produit dont on mesure le niveau doit avoir une constante diélectrique relative suffisante pour bien réfléchir l'onde. Certains hydrocarbures ou solides ayant une constante diélectrique relative inférieure à 3 posent problème.

V. MESURE DE TEMPERATURE

C'est une grandeur physique délicate à mesurer de façon précise. Un capteur de température indique sa propre température et non celle du fluide ou objet avec lequel il est en contact. C'est à l'utilisateur de choisir l'emplacement le plus judicieux. Les échanges de chaleur se font par convection (mouvements engendrés dans les fluides par les différences de températures), par conduction (par contact), par rayonnement (émission de radiation).

Une échelle de température ITS90 (International Temperature Scale) a été mise au point, la dernière réactualisation date de 1990. Elle couvre les températures de -270,15°C à 1084,62°C. Sa définition est basée sur les points triples d'éléments tels que l'hélium, le néon, l'argent, l'hydrogène et l'eau.

La thermométrie par sonde résistive et la thermométrie par thermocouple représentent 98% du marché et ce à

parts sensiblement égales. Les pyromètres infrarouges sont réservés aux très hautes températures (supérieures à 2000°C). Les thermistances, limitées aux températures inférieures à 200°C, sont des éléments non linéaires dont la précision est liée au coût. Il s'agit d'un produit industriellement peu représenté.

V.1. Les sondes résistives

Le nickel et le platine sont les deux matériaux utilisés pour leur linéarité et leur facilité de mise en œuvre. Le nickel est le plus intéressant sous 200°C du fait de sa meilleure résistance mécanique et un coefficient de température presque du double de celui du platine. Le nickel (Français par la Nouvelle Calédonie) dominait le marché européen jusque vers 1960. L'or, un matériau au comportement linéaire (de -270°C à 1063°C) aurait pu s'imposer, mais à ce métal tabou aux USA jusqu'en 1973, donc inexploitable technologiquement, a été préféré le platine produit par ces mêmes USA.

V.1.a. La sonde au platine

La résistance du platine ne varie pas linéairement en fonction de la température, la variation répond d'après la norme CEI 751 à l'équation suivante :

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3 (t - 100)]$$

Avec :

- R_t = résistance du thermomètre à la température t
- R_0 = résistance du thermomètre à 0°C soit 100Ω
- t = température en °C
- $A B C$ = coefficients déterminés par la norme ($C = 0$ pour les températures positives)

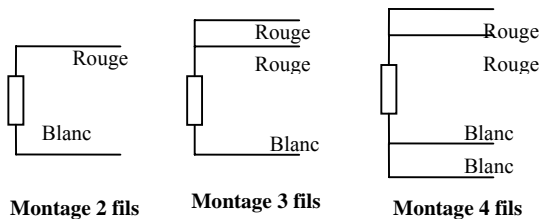
Le type le plus utilisé est la Pt100, dont la valeur est de 100Ω à 0°C et la sensibilité de 0,385 Ω/°K

Normes et tolérance d'après NFC 42330 des Pt100 de classe A $\pm(0,15+0,002t)^\circ C$

de classe B $\pm(0,3+0,005t)^\circ C$

Il existe des Pt500 (sensibilité 1,925 Ω/°K) et Pt1000 (sensibilité 3,850 Ω/°K) dont l'avantage outre la sensibilité est de permettre de négliger la résistance des fils de raccordement.

Raccordement : Les Pt100 seront raccordées à des convertisseurs qui permettront après linéarisation de fournir une information au procédé au standard de 4-20mA.



Les Pt100 existent en **montage deux fils**, raccordement simple mais la précision est affectée par la résistance de ligne. La Pt100 de type deux fils est cependant particulièrement adaptée lorsque le convertisseur est

situé en tête de canne pyrométrique soit à en général à moins de 50cm de la cellule de mesure.

Le **montage trois fils**, le plus couramment utilisé en industrie, permet de minimiser les erreurs dues aux résistances de lignes.

Le **montage quatre fils**, le plus précis permet de supprimer totalement les résistances de ligne, c'est le montage utilisé en laboratoire.

V.2. Les sondes thermoélectriques

Un thermocouple est l'association de deux fils de métaux différents connectés à leurs deux extrémités. Lorsque les deux jonctions (ou soudures) sont soumises à des températures différentes, il se produit une circulation de courant, ce qui implique l'existence d'une force électromotrice, c'est l'effet thermoélectrique.

Suite aux travaux démarrés par Thomas **Seebeck** en 1821 et revus par Athanase **Peltier** en 1834, les effets thermoélectriques sont formulés par William **Thomson** (connu sous le nom de Lord **Kelvin**) en 1857.

V.2.a. Exploitation :

Un circuit est constitué de deux conducteurs de nature différente liés à une extrémité appelée soudure chaude (sc) et à l'autre par un millivoltmètre appelé soudure froide (sf). Si la température de la soudure chaude (T) est différente de la température de la soudure froide (t_a), il y a apparition d'une fem



La soudure froide (sf) correspond à la jonction portée à la température ambiante où se trouve l'appareil de mesure, souvent le convertisseur mV/4-20mA.

La soudure chaude (sc) correspond à la jonction portée à la température à mesurer.

Tous les métaux présentent ces effets. Les associations de matériaux dont l'exploitation est la plus intéressante sont classifiées et répertoriées par la norme CEI 584-1. A noter que le tableau suivant ne fournit que des indications et ordres de grandeurs.

Lettre repère	Couple	Usage	Sensibilité $\mu V/^\circ C$	Précision
T	Cuivre Cuivre-nickel	-185°C à 300°C	38,75 μV à 0°C	1% à 0,75%
J	Fer Cuivre-nickel	-50°C à 700°C	50,38 μV à 0°C	2,2% à 0,75%
K	Nickel-chrome Nickel-Aluminium	-50°C à 1100°C	39,45 μV à 0°C	2,2% à 0,75%
E	Nickel-chrome Nickel-cuivre	0°C à 800°C	58,67 μV à 0°C	1,7% à 0,5%
R ou S	Platine-Rhodium Platine	0°C à 1700°C	11,36 μV à 600°C	1,5% à 0,25%

Un thermocouple fournit une tension qui est représentative d'une différence de température entre la soudure chaude et la soudure froide. La température de soudure froide devra être connue pour avoir une référence par rapport au 0°C et non par rapport à la température ambiante. Le convertisseur se charge de cette tâche en mesurant la température ambiante et en générant une fem compensant cet écart entre 0°C et la température ambiante. On parle de compensation de soudure froide (CSF).

Lorsqu'il se révèle nécessaire de prolonger les fils du thermocouple pour le relier au convertisseur, il convient de le faire avec des fils de même nature que ceux du thermocouple. En effet les prolonger avec de simples conducteurs de cuivre conduirait à créer deux jonctions thermoélectriques qui ajouteraient des tensions et fausseraient les mesures, d'où l'utilisation de câbles de compensation et de prolongation. Les câbles de compensations permettent de prolonger les thermocouples à moindre frais, ces câbles ont les mêmes caractéristiques que le thermocouple auquel ils sont associés mais dans une zone restreinte. (0 à 200°C, généralement).

V.2.b. Comparaison, aide au choix des sondes de mesure de température.

Avantages des sondes platine

Répétitivité et stabilité : un modèle industriel dérive de moins de 0,1°C par an

Précision : par exemple, pour des mesures à 200°C, une sonde platine et un thermocouple de même classe de précision sont fournies respectivement avec une précision de $\pm 0,5\%$ et $\pm 1,5\%$.

Linéarité : Les éléments en platine suivent une courbe plus linéaire que les thermocouples.

Câblage par des fils de cuivre ordinaires et pas de compensation de soudure froide.

Utilisable sur une gamme de température plus large

Avantages des thermocouples

Température à mesurer élevée jusqu'à 1700°C

Robustesse : du fait de leur simplicité ils résistent aux chocs et vibrations

Faible encombrement et temps de réponse rapide

VI. NORMES ATEX SECURITE

Il est une contrainte que l'on ne peut occulter lorsque lorsqu'on évoque le matériel de mesure industriel, il s'agit de la sécurité et plus précisément des normes **ATEX** (atmosphères explosives). Une atmosphère est explosive lorsqu'un mélange d'air (comburant) et une substance inflammable (combustible) sous forme de gaz, vapeur ou poussière soient en proportion telle qu'une source d'énergie, étincelle ou chaleur puisse provoquer une explosion (combustion).

Lors du traité de Rome en 1957, est publiée une clause "Atex 100a" et "118a". En 1992, suite au traité de Maastricht, on retrouve ces clauses en articles 95 et 137.

La directive 94/9/CE, issue de ces articles, applicable depuis 1996, est obligatoire depuis le 1/07/2003. Elle concerne les fabricants de matériel ATEX.

La directive 99/9/CE applicable depuis 2003, est obligatoire depuis le 1/07/2006. Elle s'adresse aux exploitants et concerne la santé et la sécurité des travailleurs.

Ces nouvelles directives européennes imposent d'exploiter un matériel apte à fonctionner en sécurité en atmosphère explosive. Ces nouvelles directives ajoutent aux gaz et vapeurs les atmosphères à poussières (exemple : silos à grains)

Parmi les nombreux types de protections utilisables pour le matériel on distinguera les deux plus couramment employés :

La protection par enveloppe antidéflagrante (ADF)

L'enveloppe de l'appareil est conçue de manière à ce qu'elle supporte la pression d'une explosion interne et que les effets de celle-ci ne puisse se transmettre à l'ATEX environnante.

La protection par sécurité intrinsèque

C'est un appareil dont le circuit est conçu de manière à ce qu'aucune étincelle ni effet thermique, ne soit capable de provoquer l'inflammation d'une ATEX.

Le marquage du matériel, codifié de façon très précise par la directive, permet de valider ces conditions et zones d'utilisation. Bien évidemment, la conception des matériels n'est pas totalement remise en cause, les appareils industriels répondaient déjà aux principales contraintes de ces directives. A noter cependant que dans la réalisation des capteurs, une part importante voire la majeure partie consiste à rendre le matériel sécurisé. La fonction mesure proprement dite représente alors un coût négligeable.

Références

- [1] Les techniques de l'ingénieur volume R6
- [2] Revue mesure, www.mesures.com
- [3] Le carnet du régleur Valance Editeur
- [4] Ineris, www.ineris.fr

Principaux constructeurs

- [4] Endress Hauser, www.fr.endress.com
- [5] ABB, www.abb.com
- [6] Emerson, www.emersonprocess.com
- [7] Lorême, www.loreme.fr

L'approche énergétique dans les systèmes électromécaniques

OLIVIER BARRE⁽¹⁾, Pascal BROCHET⁽²⁾

⁽¹⁾Lycée G.EIFFEL et ⁽²⁾L2EP-Ecole centrale de Lille, Bp48, cité scientifique 59651 Villeneuve d'Ascq, France

Email : olivier.barre@ec-lille.fr, pascal.brochet@ec-lille.fr.

Résumé : Lev Landau, prix Nobel de physique, montre dans son cours de mécanique qu'une approche énergétique permet d'introduire toutes les notions importantes de mécanique classique. En utilisant cette approche énergétique, il arrive aux notions communes d'énergie cinétique et d'énergie potentielle. Dans cet article, cette approche est utilisée pour expliciter la formulation associée aux forces de Laplace. Malgré ce résultat, il n'est certainement pas souhaitable de réduire les principes de conversion d'énergie électrique en énergie mécanique, aux seuls effets des forces de Laplace. L'examen des distributions de flux dans un moteur montre que cette interprétation n'est pas réaliste. Tout en gardant l'approche énergétique comme base de réflexion, une autre interprétation de ce phénomène est introduite. Sans pour autant vouloir révolutionner la présentation des effets mécaniques associés aux champs magnétiques, cette présentation propose une méthode alternative permettant d'exprimer sous une autre forme un des phénomènes physiques rencontré dans les moteurs électriques.

1. Introduction

Galilée, au 15^{ème} siècle, participa activement à l'écriture des lois physiques en se basant sur l'expérience. Si Galilée n'a pas fait du haut de la célèbre tour penchée les expériences qu'on lui a prêtées [8], il n'en est pas moins vrai qu'il prônait l'expérience comme élément fondamental de validation. Il reconnaissait de lui même, en dialoguant avec ses élèves, que même si l'expérience n'apportait pas toujours la validation objective escomptée, il fallait admettre qu'elle remettait très souvent en cause les anciens concepts trop rapidement admis. Alors, puisque les concepts physiques seront finalement tous remis en cause un jour, peut-on réellement les utiliser pour interpréter les phénomènes physiques observés ? La confiance dans les équations n'est que toute relative : elle est obligatoire dès qu'une prédiction d'un comportement physique est requise, elle est illusoire si l'expérience ne procure aucun des résultats espérés. La multitude de théories est une preuve que l'esprit humain recherche en permanence de nouvelles interprétations des phénomènes qu'il perçoit. De ces multiples interprétations, seules quelques unes resteront dans l'histoire et permettront des avancées techniques majeures... Bien sûr, les années auront finalement raison de ces modèles et de nouveaux concepts, potentiellement imparfaits, prendront leurs places. Dans le domaine du génie électrique, les lois semblent bien établies ; ces premières lignes resteront-elles pure philosophie ? La transformation de l'énergie électrique est le phénomène qui prend de plus en plus

d'importance au fur et à mesure que les sources d'énergie fossile s'assèchent. De ce fait, les phénomènes associés à l'énergie électrique sont, parmi les phénomènes, ceux que l'on considère comme étant les mieux maîtrisés. Il pourrait sembler inopportun de prendre comme support de discussion un phénomène aussi bien connu que celui des forces de Laplace pour illustrer la fragilité des interprétations physiques. Dans la première partie de cette présentation, le rappel des différentes formes des équations associées à la force de Laplace est mis à profit pour introduire une remarque, presque anodine, mais suffisante pour donner l'impulsion nécessaire au doute constructif. Pourtant, il est tout à fait possible de démontrer explicitement les équations usuelles à partir d'une méthode globale comme la méthode énergétique. Ce paragraphe conclut cependant sur la pertinence des équations associées aux forces de Laplace. Il apparaît, par la suite, que ces forces ne peuvent pas interpréter rationnellement le couple mécanique qui existe dans un moteur électrique. Finalement, une autre interprétation est donnée en utilisant l'approche énergétique. De plus, il est intéressant de constater que c'est cette même approche qui a permis de conduire aux équations associées à la force de Laplace présentées au début de cet article.

2. Les forces de Laplace.

Un conducteur plongé dans un champ magnétique statique ne présente pas de comportement particulier. Par contre, dès qu'un courant circule dans ce conducteur, une force extérieure apparaît et une nette tendance au mouvement se fait sentir. Donc un

conducteur, plongé dans un champ magnétique et parcouru par un courant constant est soumis à une force (Figure-1). Celle-ci est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique et à l'intensité du courant [4] [5]. Ce phénomène peut se mettre sous une forme plus mathématique, c'est l'équation de la force de Laplace (1) ou (2).

$$\vec{F} = i d\vec{l} \wedge \vec{B} \quad (1)$$

$$\vec{F}_s = \vec{J} \wedge \vec{B} \quad (2)$$

Dans l'équation (2), le courant est remplacé par la densité de courant \mathbf{J} . Pour revenir à l'équation (1), il faut intégrer la quantité \mathbf{F}_s sur la totalité de la section du conducteur. Même si la différence entre ces deux équations semble imperceptible, l'une de ces deux écritures est en contradiction avec l'esprit d'observation des phénomènes qui est à la base de toute démarche expérimentale. En effet, dans l'équation de la force de Laplace, \mathbf{F} est une force qui peut être mesurée par un instrument de mesure. Or cette force ne peut apparaître que sur des objets ayant une matérialité certaine. $d\vec{l}$ est un élément infinitésimal du conducteur parcouru par le courant i . Une force extérieure peut donc s'y exercer. Par contre, en employant la seconde formulation, la force \mathbf{F} n'est plus en présence d'éléments matériels pouvant la supporter. \mathbf{B} et \mathbf{J} sont : soit un champ magnétique, qui par nature est immatériel, soit une densité de courant qui peut être interprétée comme un déplacement de charges électriques positives. Or celui-ci ne peut être que virtuel car seuls les électrons sont capables de se déplacer et leur charge est négative. Il est bien sûr possible de revenir finalement vers l'élément conducteur au prix de quelques artifices d'écriture [3].

Le problème apparaît maintenant de manière plus explicite. Trop souvent, des interprétations erronées ou des présentations trop formalisées conduisent à des erreurs dommageables pour la compréhension des phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement

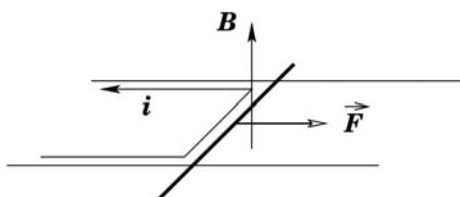


Figure-1 : représentation géométrique de la force mécanique issue de l'interaction d'un champ et d'un courant associé à un élément conducteur

des équipements électriques. Il devient donc important de rappeler que, dans ce domaine, les équations qui se proposent d'explicitier localement un phénomène physique sont en fait issues d'analyses globales [1]. L'approche énergétique est une approche globale qui utilise les bilans énergétiques associés à un système isolé pour exprimer, par exemple, l'intensité des forces extérieures qui s'exercent sur ce système. Une hypothèse sous-jacente à ce concept doit être rappelée, il faut que le rendement d'une telle conversion soit de 1 pour que les formulations associées à cette approche soient acceptées.

3. Les forces de Laplace et l'approche énergétique.

Lev Landau, Richard P. Feynman et bien d'autres encore, utilisent cette approche énergétique comme fil conducteur dans leurs publications traitant de la mécanique et de ces principes de base. Dans son cours de mécanique, Richard P. Feynman introduit très rapidement cette entité scalaire et ne fait apparaître le temps et le mouvement que dans les chapitres suivants. De même, Lev Landau, en utilisant une présentation légèrement différente, ne change pas, pour autant, de point de vue. L'énergie totale d'un système isolé se conserve. Si l'énergie du système isolé ne se conserve pas, cela veut dire qu'un événement extérieur est intervenu sur le système. C'est l'interprétation des effets de l'événement extérieur qui est la partie sensible de cette approche. En effet, interpréter la variation de l'énergie du système isolé comme le travail d'une force extérieure ne peut être admis que si aucune autre forme d'énergie n'est échangée.

Pour mettre en évidence les effets entre un courant électrique et un champ magnétique, les enseignants de physique ont à leur disposition un banc d'essai qui

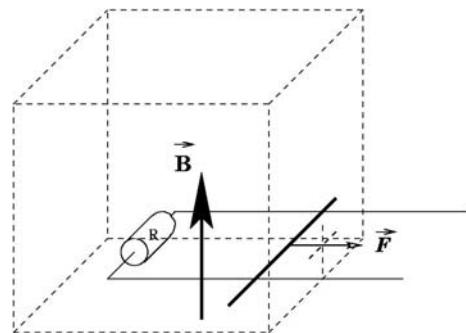


Figure-2 : En l'absence de circuit fermé, il n'est pas possible d'écrire un bilan énergétique complet. Dans cet exemple, une résistance est utilisée comme élément fermant le circuit. La résistance peut être remplacée par une source de courant.

valide, sans contestation possible, le fait qu'une force apparaît dès qu'un conducteur plongé dans un champ magnétique est traversé par un courant. Ce phénomène va être analysé sous un aspect énergétique et le postulat qui accompagne cette analyse est, que la variation d'énergie du système isolé ne peut produire que de l'énergie mécanique. La figure 2 est celle qui se rencontre dès que les forces de Laplace sont introduites. Cette figure fait apparaître un élément nouveau. En effet, le courant ne peut circuler que dans un circuit fermé. En l'absence de circuit fermé, aucun bilan énergétique ne peut être écrit.

4. Bilan énergétique en présence d'un courant.

Comme un bilan énergétique va être établi, une grande précaution doit accompagner son écriture. En particulier, les orientations, définissant les sens positifs pour toutes les entités vectorielles, doivent être rappelées.

Dans la figure 3, la force que subit la barre est orientée comme la vitesse. Avec cette configuration, la barre se meut naturellement dans le sens des x croissants. Pour la partie mécanique, le travail de cette force qui s'exerce sur cet élément $d\mathbf{l}_0$ pendant un temps dt s'écrit sous la forme proposée par l'équation 3.

$$dW_{\text{mécanique}} = (\vec{F} \cdot \vec{v}) dt \quad (3)$$

Comme un courant circule dans cet élément linéaire, il semble naturel de lui associer une énergie électrique (4). dU est la différence de potentiel au borne de cet élément $d\mathbf{l}_0$ et i le courant qui circule dans celui-ci.

$$dW_{\text{électrique}} = (d\vec{U} \cdot \vec{i}) dt \quad (4)$$

L'approche énergétique propose d'interpréter la variation d'énergie mécanique comme égale et opposée à la variation d'énergie électrique (5).

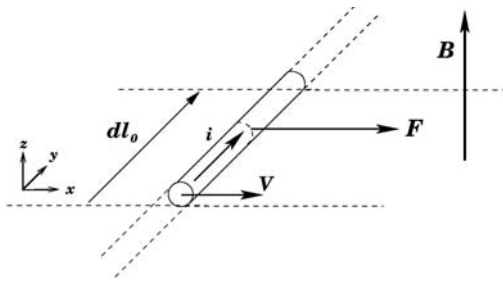


Figure-3 : sens conventionnel positif pour toutes les entités vectorielles présentes.

$$(d\vec{U} \cdot \vec{i}) dt = -(\vec{F} \cdot \vec{v}) dt \quad (5)$$

En d'autre terme, l'énergie mécanique délivrée est entièrement issue de la variation d'énergie électrique du système. Avec une telle équation, les aspects magnétiques sont totalement absents. Or, ceux-ci vont pouvoir réapparaître en utilisant les lois qui régissent les phénomènes électromagnétiques. Dans le cas présent, la seule loi indispensable est la deuxième loi de Maxwell (6). Cette loi n'est qu'une mise en forme plus formelle de la circulation du champ électrique le long d'un contour fermé. Cette circulation conduit à l'équation usuellement rencontrée (7) [3] [4].

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$e = -\frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (7)$$

Compte tenu des propriétés géométriques associées à la figure-3, il est possible d'en déduire le champ électrique qui apparaît au niveau de l'élément linéique $d\mathbf{l}_0$, mais seule la composante selon l'axe y peut être associée au phénomène électromagnétique (8).

$$E_y = -(\vec{v} \wedge \vec{u}_y) \cdot \vec{B} \quad (8)$$

Comme l'élément linéique $d\mathbf{l}_0$ est orienté selon l'axe y , il est aisé d'exprimer la différence de potentiel aux bornes de cette entité $d\mathbf{l}_0$ (9).

$$d\vec{U} = -((\vec{v} \wedge d\vec{l}_0) \cdot \vec{B}) \vec{u}_y \quad (9)$$

Enfin, en reportant cette expression dans l'équation (5) on arrive à l'équation (10) et il est maintenant possible d'exprimer la force sous une forme plus familière en utilisant quelques propriétés liées aux opérateurs employés (11) et (13).

$$-((\vec{v} \wedge d\vec{l}_0) \cdot \vec{B}) \vec{u}_y \cdot \vec{i} dt = -(\vec{F} \cdot \vec{v}) dt \quad (10)$$

$$u_1 \wedge u_2 \cdot u_3 = -u_3 \wedge u_2 \cdot u_1 \quad (11)$$

$$((-\vec{B} \wedge d\vec{l}_0) \cdot \vec{v}) \vec{u}_y \cdot \vec{i} dt = (\vec{F} \cdot \vec{v}) dt \quad (12)$$

$$u_1 \wedge u_2 = -u_2 \wedge u_1 \quad (13)$$

$$((d\vec{l}_0 \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v}) \vec{u}_y \cdot \vec{i} dt = (\vec{F} \cdot \vec{v}) dt \quad (14)$$

Comme $d\vec{l}_0$, support du courant i , est orienté selon l'axe y , le courant i perd son aspect vectoriel et se comporte comme un scalaire ; l'équation 14 peut se mettre sous la forme suivante (15).

$$i_y \left(\left(d\vec{l}_0 \wedge \vec{B} \right) \cdot \vec{v} \right) dt = \left(\vec{F} \cdot \vec{v} \right) dt \quad (15)$$

$$i \left(d\vec{l}_0 \wedge \vec{B} \right) = \vec{F} \quad (16)$$

Enfin, exprimer la force sous la forme de l'équation (16) revient à admettre qu'il n'existe aucune composante de cette force selon les axes y et z . L'équation (15) ne permet que d'affirmer l'égalité des composantes suivant la direction donnée par \vec{v} . Finalement, aucune composante de la force \vec{F} selon les axes x et z ne peut être liée à la variation d'énergie du système. Alors que la loi de Laplace semble d'un abord simple et difficile à remettre en cause, son obtention, en utilisant une approche énergétique montre, d'une part qu'une hypothèse doit être introduite quant aux énergies mises en jeu et d'autre part que l'aspect scalaire de l'énergie ne permet pas d'appréhender la totalité du phénomène. Seules, certaines composantes peuvent être quantifiées et les autres sont par défaut nulles. C'est à l'approche expérimentale qu'il appartiendra de valider de telles hypothèses.

Avec une loi aussi bien acceptée que la loi de Laplace, il est aisé de mettre en évidence les limitations liées à la méthode énergétique. L'obtention de l'expression de la force de Laplace en utilisant l'approche énergétique, met en évidence le principe de base qui lui est associé. Des choix doivent être réalisés vis à vis des énergies mises en jeu. Rien n'interdit de faire des choix qui sont sans rapport avec les phénomènes physiques effectivement présents.

5. Bilan énergétique dans un moteur.

Si le bilan énergétique est en accord avec l'expérience, ce n'est pas pour autant que le phénomène est bien décrit. L'exemple du moteur électrique à courant continu en est une bonne illustration. Les méthodes classiques qui se proposent d'établir le bilan énergétique relatif au moteur électrique font intervenir, d'une part, la puissance mécanique délivrée et, d'autre part, la puissance électrique absorbée. Un terme est couramment employé pour désigner la puissance échangée entre la partie fixe et la partie mobile du moteur : c'est la puissance « électromécanique » ou « électromagnétique ».

Toutefois, en regardant l'écriture de cette puissance (17), il apparaît qu'elle est obtenue au moyen du produit d'une force électromotrice et d'un courant électrique. Elle est donc similaire à une puissance électrique.

$$P_{\text{Electromagnétique}} = e i \quad (17)$$

Dans cette équation, i est le courant qui circule dans l'induit et e , la force contre-électromotrice qui est engendrée par la rotation de l'induit. Cette puissance, précédemment nommée puissance électromagnétique, est la puissance maximale que le moteur pourra délivrer sous forme mécanique. Une très grande similitude se rencontre entre cette approche, qui utilise une puissance électrique pour produire une puissance mécanique et la démonstration basée sur l'énergie électrique qui conduit à l'écriture de la force de Laplace. Il semble donc naturel d'associer le couple mécanique, qui existe dans un tel moteur, aux forces de Laplace. Cette approche est d'ailleurs l'approche utilisée pour introduire les moteurs électriques dans les filières conduisant au baccalauréat [9].

Les moyens de simulation sont maintenant capables de prédire la distribution des champs magnétiques dans tous les systèmes électromagnétiques. Dans des conditions bien définies, ces moyens de simulation proposent une très bonne image de la distribution du champ magnétique avec un écart, entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées, nettement inférieur à 5%. Par exemple, en étudiant un système aussi simple que les bobines de Helmholtz, il apparaît que ce système, qui peut-être étudié analytiquement, est aussi très bien pris en compte par les méthodes numériques de type éléments finis. Cette dernière méthode, basée sur l'emploi des calculs à présentation linéaire ne peut toutefois fournir qu'un résultat approché [10]. La figure 4 montre que les prédictions de la composante axiale du champ magnétique selon l'axe Z , issues des méthodes analytiques ou numériques, sont toutes en accord avec les valeurs mesurées expérimentalement. Des faibles écarts sont visibles et ils ne seront jamais totalement annulés. En effet, les imprécisions dans les calculs numériques, les hypothèses simplificatrices, comme l'évaluation du rayon des bobines plates équivalentes et les erreurs des appareils de mesures existeront toujours.

Tout comme le soulignait la conclusion associée au chapitre précédent, il faut valider les hypothèses introduites dans l'interprétation d'un phénomène. Dans le cas présent, des simulations numériques, montrent que les conducteurs associés à un rotor de machine

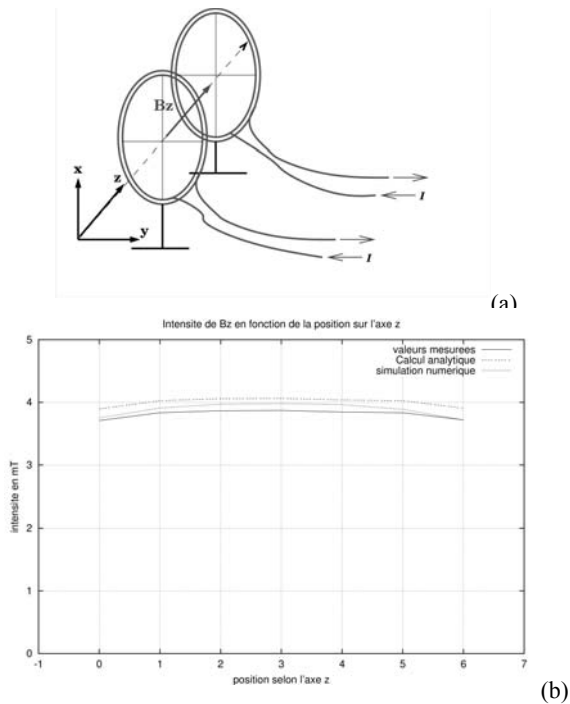


Figure-4 : En utilisant des bobines de Helmholtz (a), il est très aisé de mettre en évidence que les méthodes numériques peuvent rendre compte d'un phénomène physique aussi fidèlement que les méthodes analytiques (b).

électrique ne peuvent prétendre être l'objet de force de Laplace (Figure-5). En effet, la règle du flux maximum veut que l'induction magnétique recherche un chemin qui la fait passer par les matériaux de forte perméabilité relative. Comme le cuivre est un matériau amagnétique et qu'il est entouré par des pièces ferromagnétiques, le flux évitera finalement ce milieu peu favorable. Avec une telle conclusion, il devient difficile de proposer comme source du couple mécanique, les forces de Laplace.

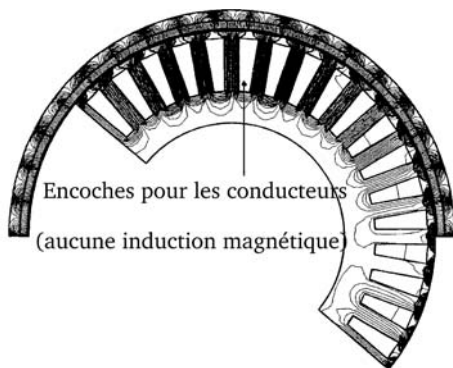


Figure-5 : Sur cette coupe de moteur à courant continu, il apparaît très clairement que, d'après la simulation numérique, le champ magnétique, ne peut pas réagir avec le courant circulant dans les conducteurs d'induit.

En l'absence de flux magnétique, aucun couple mécanique ne peut être délivré. Comme aucun flux n'existe au niveau des conducteurs, il faut rechercher la source de ce couple mécanique dans les matériaux associés au moteur. La fabrication des pièces massives se fait de manière à éviter les courants induits. En conséquence, il n'est pas souhaitable d'aborder ce problème en utilisant l'énergie électrique associée à ces courants comme source de puissance mécanique. Certains anciens ouvrages, comme ceux des éditions MIR, introduisent explicitement un autre point de vue. En particulier, ils font apparaître l'énergie magnétique comme source première d'énergie [2] [3].

6. L'énergie magnétique.

Il est très facile d'avoir un support matériel pour aborder les problèmes associés à l'énergie mécanique, il est beaucoup plus difficile de dissiper sur une énergie associée à un support immatériel comme un champ magnétique. Heureusement l'objectif n'est pas, à cet instant, d'explicitier l'origine de cette énergie. Il suffira d'admettre son existence pour en calculer sa densité, c'est à dire l'énergie par unité de volume en tout point de l'espace. L'équation suivante (18) est alors l'équation de référence.

$$W_{(v)} = \int_{B=0}^{B_{\max}} H dB \quad (18)$$

Pour un état donné d'un système isolé, il est possible de calculer l'énergie magnétique associée. Après application d'un déplacement $d\vec{l}$ de l'un des constituants du système, il est toujours possible de calculer la nouvelle énergie magnétique jointe (Figure-6). Cette variation d'énergie magnétique, $\Delta W_{\text{magnétique}}$, est assimilée à l'inverse du travail, $\Delta W_{\text{mécanique}}$ de la force mécanique \vec{F} nécessaire au déplacement du constituant. Le calcul de cette force globale est ainsi réalisé (19).

$$\Delta W_{\text{magnétique}} = -\Delta W_{\text{mécanique}} = -\vec{F} \cdot d\vec{l} \quad (19)$$

Ce concept peut avantageusement être mis à profit pour étudier les moteurs électriques. En effet les performances des méthodes de résolutions, basées sur les éléments finis, permettent d'évaluer précisément le flux en tout point de ces dispositifs complexes. Il est aisé d'utiliser cette information pour calculer localement l'énergie magnétique, l'énergie totale du système ainsi que sa variation en fonction d'un déplacement. Les actes de congrès internationaux sont riches de ces problématiques et il n'est pas réaliste de

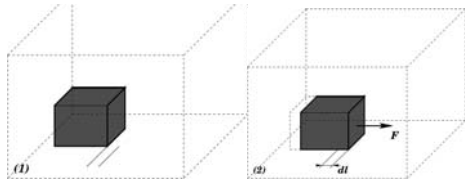


Figure-6 : Un corps isolé, dans la situation associée au premier dessin (1) est soumis à un champ magnétique. Ce corps est déplacé au moyen d'une force F sur une distance dl en étant toujours soumis à ce champ magnétique (2). A chacun de ces deux états, une énergie magnétique peut être associée

vouloir tous les citer. Le laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance de Lille ne fit pas d'exception et cette méthode fut expérimentée. Une publication, en 1998 [11], montre que cette méthode est parfaitement capable de prédire le couple mécanique qu'un moteur asynchrone à cage peut délivrer. Les simulations numériques donnent le flux en tout point de la machine et par voie de conséquence, autorisent le calcul de l'énergie magnétique. En associant la variation d'énergie magnétique engendrée par une faible rotation du rotor à l'énergie mécanique délivrée, le couple mécanique disponible est finalement déterminé (20).

$$dW_{magnétique} = -\vec{T} \cdot d\vec{\theta} \quad (20)$$

Cette approche globale est capable de conduire à une équation locale si la méthode des travaux virtuels est employée [6]. Pour des matériaux linéaires, où seules les propriétés magnétiques des matériaux sont prises en compte, il est possible d'écrire une formulation locale pour exprimer la force d'origine magnétique (21).

$$F_n = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_r} \right) B_n^2 + \frac{1}{2} \mu_0 (1 - \mu_r) H_t^2 \quad (21)$$

Cette formulation ne se propose que de quantifier localement la force normale qui existe à la surface d'un corps dont les propriétés magnétiques sont différentes de celles du milieu ambiant. Avec une telle écriture, il apparaît immédiatement qu'un corps amagnétique présente un comportement neutre. Si des matériaux ferromagnétiques sont étudiés, une expression plus simple peut être utilisée, car la composante tangentielle du champ magnétique devient négligeable sur la surface de ce corps. Cette équation, référencée 22, est d'ailleurs une formulation usuellement rencontrée pour évaluer la force d'origine magnétique.

$$F_n' = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0} B_n^2 \quad (22)$$

Un grand nombre de formulations se propose de calculer cette pression d'origine magnétique : Tenseur de Maxwell, courants équivalents, masses magnétiques équivalentes... Dans le cas des matériaux ferromagnétiques, ces différentes équations conduisent à des résultats similaires. Il n'est pas réaliste qu'un phénomène physique soit décrit par des équations différentes, même si celles-ci convergent vers des résultats voisins quand des matériaux fortement magnétiques sont utilisés comme support d'étude. En particulier, il faut dégager de ces différentes approches, le principe physique le plus adapté à la description du phénomène, car c'est ce principe qui servira de référence pour les développements futurs.

7. Aspect expérimental.

Seule une expérience donnera un avis sur la pertinence de ces différentes interprétations. Un corps souple, possédant des propriétés magnétiques est plongé dans un champ magnétique hétérogène (Figure-7). Il subit sur sa surface des forces. Celles-ci sont suffisantes pour engendrer une déformation observable. En appliquant les formulations associées au calcul des forces locales, il est possible de calculer les

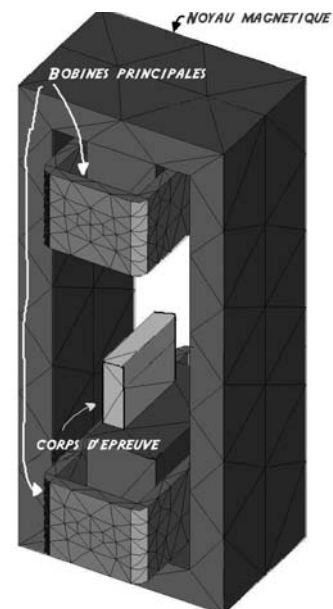


Figure-7 : Un circuit magnétique est utilisé pour engendrer un champ magnétique hétérogène. Un corps d'épreuve, de faible perméabilité relative, est soumis à ce champ. Une déformation de ce corps est observée et elle va servir de support à la validation expérimentale du calcul des forces locales.

distributions de forces qui s'exercent sur sa surface. A partir de ces distributions, la déformation totale du corps peut être déterminée (Figure-8). Si la déformation observée est similaire à l'une des déformations calculées, les distributions de force associées à cette méthode de calcul des forces locales sont donc représentatives.

Soumis à des contraintes extérieures, un solide se déforme. Pour que cette déformation soit effectivement visible, il faut : soit des intensités de contrainte particulièrement élevées, soit un module d'élasticité longitudinal très faible. C'est cette dernière solution qui est retenue. Le module d'élasticité du corps d'épreuve est de $70\,000\text{ N/m}^2$ et la perméabilité relative est de 3,1. En présence d'un courant de 3 ampères, le corps se déforme et un déplacement de 0,6 mm est mesuré (Fig-9). Ce déplacement est comparé aux résultats des simulations numériques et il apparaît que la formulation issue de l'approche énergétique donne une bonne interprétation du phénomène observé. Cette formulation prédit un déplacement de 0,59 mm [6] [7].

Les autres formulations, même si elles fournissent des valeurs ayant des ordres de grandeur similaires, donnent toutefois des résultats plus éloignés de la réalité. Effectivement, il s'est avéré que les méthodes liées aux courants équivalents ou aux masses magnétiques équivalentes donnent une déformation bien inférieure à celle qui est observée. Comme l'objectif de cet article n'est pas l'analyse des autres formulations, des informations plus étendues sont disponibles par simple téléchargement [6]. Il apparaît finalement que la non convergence des formulations est bien liée à la faible perméabilité relative du matériau utilisé comme corps d'épreuve. La conception de l'expérimentation se révèle ainsi être aussi un point capital dans la recherche d'une validation expérimentale des équations associées aux phénomènes physiques.

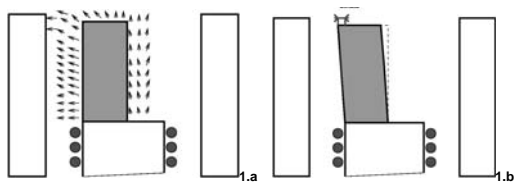


Figure-8 : En présence d'un champ magnétique hétérogène (1.a), le corps d'épreuve se déforme et le déplacement de l'arête supérieure (1.b) est utilisé comme mesure validant la formulation locale de force.

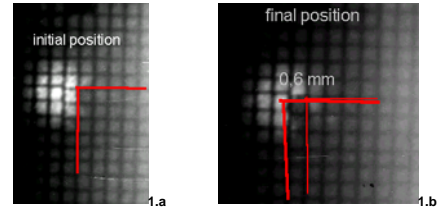


Figure-9 : En visualisant cette arête en l'absence et en présence du champ magnétique, un déplacement de 0,6 mm peut ainsi être observé.

8. Conclusion.

En prenant comme exemple les forces de Laplace, souvent associées à une approche expérimentale, il est possible de montrer qu'un tel résultat peut aussi être confirmé par une approche plus théorique et générale que l'approche énergétique. Même si cette bonne convergence est un point positif, elle apporte son lot de doutes. En effet, l'approche énergétique met en postulat l'existence d'un phénomène. Celui-ci est considéré comme étant le phénomène qui peut naturellement exister. Ecrire que la variation d'énergie électrique est associée au travail d'une force extérieure, conduit certes, à l'écriture de la force de Laplace, mais interpréter le couple d'une machine comme étant le résultat des forces de Laplace n'est qu'une des possibilités offertes. Comme cette interprétation est contredite par l'examen des distributions de flux dans une machine, doit-on en conclure que les forces de Laplace sont une vue de l'esprit. La réponse est bien sûr négative car des expériences simples la confirment tous les jours. Des analyses globales comme les bilans de puissance, usuellement utilisés pour déterminer les schémas équivalents des transformateurs ou des moteurs, ne sont pas à mettre en doute. Le problème se pose de manière critique dès qu'un examen interne est requis. Par l'intermédiaire de l'expérience décrite dans la dernière partie de cet article, l'approche énergétique montre qu'elle est capable de prédire, au niveau local, le comportement des matériaux en présence de champ magnétique. Donc, utiliser cette approche pour quantifier les efforts mécaniques dans les rotors des machines n'est pas hors de propos car les autres éléments présents, comme les conducteurs, ne produisent que des efforts mécaniques négligeables et bien incapables d'imposer le couple moteur délivré. Bien sûr, il ne faut pas oublier que cette approche a elle aussi ses limites, elle n'est justement pas capable d'interpréter les phénomènes secondaires ni de décrire correctement le comportement des systèmes où justement aucun phénomène est majoritaire. Il n'est pas nécessaire d'aller dans des laboratoires de pointe ni

d'étudier dans les moindres détails, les dernières publications pour mettre en évidence ces limites... Einstein et De Hass l'ont fait pour nous en expliquant les phénomènes gyromagnétiques. Si la formulation locale présentée est utilisée pour quantifier ces phénomènes, aucun résultat acceptable ne peut être produit. Pour les machines électriques, la nature aide particulièrement les électriciens en leur autorisant des réalisations techniques où il n'est pas rare que les rendements soient de l'ordre de 95%. Ce qui fait qu'il est possible d'estimer précisément les caractéristiques mécaniques des machines en utilisant l'approche énergétique.

9. Bibliographie

- [1] L. Landau et E. Lifchitz, « Physique Statistique, Tome 5 », Editions MIR., Moscou, 1967.
- [2] A. Ivanov Smolenski, "Machines Electriques, Tome 1 et 2", Editions MIR. Moscou 1983
- [3] D. Sivoukine, « Cours de Physique Générale, Tome 3, Electricité », Editions MIR. Moscou 1983.
- [4] R. Feynman, « Electromagnétisme, Tome 1 et 2 », Interéditions, Paris, 1992.
- [5] E. du Tremolet de Lacheisserie, Ouvrage collectif, « Magnétisme, Tome 1, Fondements », Presses universitaires de Grenoble. 1999.
- [6] O.Barré, « Contribution à l'étude des formulations de calcul de la force magnétique en magnétostatique, approche numérique et validation expérimentale », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Lille, 2003. (<http://tel.ccsd.cnrs.fr/tel-00005921>)
- [7] O.Barré, P. Brochet, « Méthode énergétique et travaux virtuels, Application au calcul des forces locales associées aux champs magnétique et électrique », Compte rendu du colloque EF-2005, 14 et 15 septembre 2005 à Grenoble.
- [8] Encyclopédie UNIVERSALIS, Corpus Tome 8, p-209.
- [9] Ministère de l'éducation nationale, Direction de l'enseignement scolaire, Sciences et Technologie Industrielle, Spécialité Génie Electrique. Instructions et Commentaires de Physique Appliquée, (www.eduscol.education.fr/prog/)
- [10] G.Fournet, « Electromagnétisme à partir des équations locales », 2^{ème} édition, 1985, MASSON.
- [11] Numerical models for rotor cage induction machines using finite element method Boualem, B.; Piriou, F.; Magnetics, IEEE Transactions on Magnetics, Volume 34, Issue 5, Part 1, Sept. 1998 Page(s):3202 - 3205

L'introduction de l'enseignement de l'automatique en France

Patrice REMAUD

Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle École Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers,
40 avenue du Recteur Pineau, 86022 POITIERS Cedex France
patrice.remaud@univ-poitiers.fr

Résumé : Cette communication présente l'introduction de l'enseignement de l'automatique en France au lendemain de la seconde guerre mondiale.

Mots-clés : Histoire des sciences, histoire des techniques, histoire de l'automatique.

1. Introduction

L'existence d'enseignements relatifs aux techniques de la régulation date du début du XXe siècle ; ces enseignements se déroulent dans quelques écoles d'ingénieurs mais ils restent, jusqu'au milieu du XXe siècle, marginaux. Il faut attendre la fin des années 1940 et l'extension de l'automatisation à l'ensemble des secteurs industriels pour qu'un besoin d'enseignement dans les cursus scolaires et universitaires soit ressenti. Cette nécessité d'un enseignement est bien sûr parallèle à l'évolution technologique et industrielle des techniques de régulation. En effet, dès le milieu du XIXe siècle, un embryon d'enseignement des techniques de régulation se crée [1]; cet enseignement se déroule, au départ, presque uniquement dans les écoles d'ingénieurs de mécanique. A partir de la fin du XIXesiècle, l'enseignement de l'électricité industrielle se développe et inclut une part de techniques de régulation. Jusqu'au début des années 1950, l'enseignement de la régulation reste l'apanage des écoles d'ingénieurs, principalement celles spécialisées en mécanique et en électricité. On le rencontre aussi dans les domaines de la thermique et du génie chimique. De leur côté, et dès le début du XXe siècle, les universités commencent à développer des enseignements à vocation technologique, mais ceux-ci resteront longtemps à un niveau modeste et ne concerneront pas les techniques de régulation avant les années 1950.

Au lendemain de la seconde guerre mondiale, le développement industriel et militaire entraîne un besoin de formation à tous les niveaux. Dans un premier temps, un certain nombre d'écoles et d'universités créent des enseignements spécialisés. Dans les années 1950, la pression du monde industriel, relayée par des associations professionnelles, conduit à la mise en place de plans concertés de développement des enseignements supérieurs scientifiques et technologiques. Cela se traduit, en particulier, par la

création des troisièmes cycles, en 1954, dans lesquels grandes écoles d'ingénieurs et universités finiront par se retrouver. Parallèlement, il apparaît une tentative de regroupement des enseignements jusqu'alors dispersés des différents domaines d'application des régulations et des automatismes dans le cadre d'une seule discipline scientifique. Ces efforts aboutiront, à la fin des années 1950 et dans les années 1960, à la création de la discipline automatique. A la même époque, au sein de cette nouvelle discipline, les premiers laboratoires de recherche en automatique vont être créés.

2. L'expression d'un besoin de formation

Au cours de la fin des années 1940 et tout au long des années 1950, une prise de conscience de la nécessité d'introduire un enseignement autour des techniques de régulation, mais surtout de l'automatique nouvelle, s'exprime avec beaucoup de vigueur. L'un de ceux qui exprime le plus fortement, à cette époque, ce besoin de formation est Victor Broïda. Il est né le 25 décembre 1907 à Moscou ; il est le fils d'un ingénieur-chimiste directeur d'entreprise. Il a effectué ses études à l'Institut polytechnique de Grenoble, au Conservatoire national des arts et métiers et à l'Université de Paris ; il est ingénieur électricien et thermicien et ingénieur-docteur. Dans sa carrière professionnelle, il fut ingénieur, ingénieur en chef, Directeur, Président directeur général dans diverses entreprises de Thermique industrielle (1930-1937), d'Organisation scientifique du travail (1944-1951), et d'Automatisme industriel (1938-1940 puis à partir de 1951). Il assura des fonctions de professeur à l'Université du travail de Charleroi (1954-1956), à l'Institut français du Froid industriel (1950-1958); il fut Directeur des études de l'Enseignement supérieur de l'Automatisme industriel au Conservatoire national des arts et métiers (1956-1958). Victor Broïda fut le Vice-président fondateur, puis membre d'honneur de l'Association française de régulation et d'automatisme et Président du Comité fondateur provisoire, puis Vice-président, puis Rédacteur du Bulletin d'information de

l'International Fédération of Automatic Control. Son rôle dans la genèse de l'automatique en France fut déterminant. Il est décédé en 1976.



Fig. 1. Victor Broïda

Dès 1945, Marcel Véron exprime dans son introduction à la série de conférences du Conservatoire National des Arts et Métiers d'avril et de mai 1945 [2] sur la régulation thermique une réelle inquiétude face à la timidité du monde industriel vis à vis des techniques de régulation :

Sur le plan économique et social, la régulation thermique doit jouer un rôle de première importance, puisque toutes les industries -ou presque- sont intéressées aux moyens de chauffage.[etc.]. On peut s'étonner que, dans ces conditions, la régulation thermique ne soit pas plus répandue en France.

Au lendemain de la seconde guerre mondiale, avec la découverte des récents développements de l'automatique aux États-Unis et en Angleterre au cours de la deuxième moitié des années 1940, la nécessité d'introduire les nouvelles méthodes de régulation dans le monde industriel s'ajoute au problème précédent. A part les ingénieurs du domaine militaire et des télécommunications, ceux d'autres secteurs industriels ignorent tout de ces nouvelles méthodes. Cette volonté d'introduire la régulation dans le monde industriel français entraîne la nécessité de créer des formations pour les ingénieurs en poste dans le monde industriel, mais aussi de l'introduire dans les formations initiales telles que les écoles d'ingénieurs et les universités. Dans un cours texte intitulé, *Le problème de la formation professionnelle* [3], Jean Vivié, rédacteur en chef de la revue *Mesures.Essais.Régulation.Contrôle industriel*, propose de profiter de la création d'un Institut français des combustibles et de l'énergie pour créer un enseignement général de « contrôle industriel»:

La naissance d'un Institut Français des Combustibles et de l'Énergie ne pourrait-elle être la prémisse de la mise sur pied d'un enseignement

général de contrôle industriel, puisque -sans négliger l'importance qu'elles revêtent dans d'autres domaines- c'est sans conteste dans les industries mettant en oeuvre la thermique que les techniques de mesure et de régulation connaissent leurs plus amples développements ?

Cette intervention est suivie par un article de Victor Broïda dont le titre résume son sujet, Pour un enseignement général du contrôle automatique [4]. C'est un plaidoyer pour une introduction généralisée de l'enseignement de l'automatisme :

Un développement rapide de cet automatisme dans l'industrie française se heurte à plusieurs obstacles dont le moins important n'est sûrement pas le manque d'informations objectives sur les principes généraux, les buts et les réalisations pratiques de la régulation automatique qui seraient mises à la disposition des usagers de ces techniques particulières ou, en d'autres termes, le manque d'enseignements généraux de l'automatisme s'adressant à ces usagers.

Broïda constate qu'en France, et contrairement aux États-Unis, « il n'existe à l'heure actuelle, dans quelques écoles, que des enseignements partiels de l'ensemble de la question, se rapportant aux applications de l'automatisme à des techniques déterminées ». Suit une analyse des raisons de l'échec français dans ce domaine face à la réussite américaine :

C'est peut être dans ce contraste entre la France et l'étranger, qu'il convient de rechercher, tout au moins partiellement, les raisons de l'extraordinaire développement de l'automatisme aux États-Unis. C'est peut être pour des raisons analogues que, sur un plan plus élevé, des savants spécialisés en cette matière, tels qu'un Nyquist ou un Bode ne se situent plus dans le pays de Laplace, de Fourier et de Cauchy dont les recherches sont à la base de leur propre oeuvre.

Enfin en 1955, l'introduction de l'automatisme dans le monde industriel est amorcée ; Victor Broïda se pose donc le problème du lien entre son introduction récente et l'enseignement dans un article paru dans le numéro de février 1955 de la revue *Mesures.Essais.Régulation.Contrôle industriel* et intitulé *Un enseignement d'ensemble de l'automatisme et de la régulation automatique est-il une nécessité?* [5]:

L'introduction massive de l'Automatisme dans l'industrie est sans conteste le phénomène évolutif de la période actuelle ; il convient donc, avant tout, d'en examiner les conséquences sur le plan de l'enseignement.

Broïda soulève la nécessité d'une formation pour les cadres de l'industrie à ces nouvelles techniques :

Il serait illusoire d'attendre de la part de ces techniciens de l'industrie qu'ils fassent appel aux

techniques de la régulation automatique chaque fois que leur utilisation s'avérera nécessaire s'ils ne sont pas suffisamment avertis des nombreuses ressources offertes par celles-ci.

En 1956, dans l'éditorial de la revue *Automatisme* d'avril de cette année, l'adhésion à la nécessité d'un enseignement semble acquise auprès des grandes écoles et de l'université :

Maintenant que l'automatisme s'est imposé à l'opinion publique et au Gouvernement, l'Université et les Grandes Ecoles s'inquiètent de dispenser [...] ces disciplines qui pourront en faire des architectes de l'automatisme [...]. [6]

En août 1958, la revue *Automatisme* propose une nouvelle rubrique intitulée « Enseignement ». D'emblée, le problème de l'enseignement est saisi à bras le corps :

Le problème de l'automatisation se pose avant tout comme un problème de formation d'éducation, d'enseignement. Ce fait n'a pas échappé à notre Centre National de l'Automatisation, dont le président André Léauté (fils d'Henri Léauté, père des célèbres cycles éponymes), membre de l'Institut, a tenu à diriger lui-même les travaux d'une Commission chargée, au sein de cet organisme, de se pencher sur ce problème majeur de notre temps[...]. [7]

C'est sous cette rubrique que seront publiées les principales initiatives et expériences d'enseignement de l'automatique en France.

3. L'enseignement de la régulation dans les écoles d'ingénieurs au XIXe siècle et au début du XXe siècle.

A. Dans le domaine de la mécanique

Au cours du XIXe siècle, l'enseignement de la régulation de vitesse fait partie des enseignements de mécanique. Jean Victor Poncelet, qui fut professeur de mécanique à la Faculté des sciences de Paris et à l'École d'application d'artillerie et du génie, a publié en 1825 un *Traité de mécanique appliquée aux machines* [8] réédité plusieurs fois. La deuxième section de la première partie de cet ouvrage commence par un titre on ne peut plus explicite : *Des principaux moyens de régulariser l'action des forces sur les machines et d'assurer l'uniformité du mouvement.* Cette section traite en particulier des différents types de régulateurs et «gouverneurs» («governor», appellation anglaise des régulateurs à l'époque), des volants, des modérateurs. Le *Traité de mécanique générale* [9] de H. Résal de 1875 qui reprend son cours de l'École polytechnique, inclut deux chapitres traitant des techniques de régulation, un sur les volants et un sur les régulateurs. Il décrit les principaux types de

régulateurs, il définit la sensibilité d'un régulateur et traite du mouvement d'une machine « à partir du moment où le régulateur entre en fonction ».

En 1904, Léon Lecornu, ingénieur en chef des Mines et professeur à l'École supérieure des mines, publie un traité intitulé *Les régulateurs des machines à vapeur* [10]. Cet ouvrage entièrement consacré aux techniques de régulation montre qu'au début du XXe siècle, la régulation est devenue une part suffisamment importante de la mécanique pour qu'on lui consacre un ouvrage particulier. Une partie de l'ouvrage est consacrée à l'étude détaillée des différents régulateurs et comporte un premier chapitre sur les qualités des régulateurs : sensibilité, régularité, stabilité, puissance, promptitude. Une autre partie intitulée, *Dynamique du régulateur*, expose les différents moyens d'analyses théoriques du fonctionnement des systèmes comportant un régulateur. Les théories de la stabilité de Wischnegradski, la méthode d'étude des oscillations à longue période de Léauté, ainsi que d'autres, sont développées et comparées. Dans cette partie, on trouve également une section sur les recherches expérimentales effectuées au début XXe siècle dans le but d'enregistrer les comportements dynamiques de systèmes perturbés. Compte tenu de l'insuffisance des analyses théoriques existantes à cette époque autour des systèmes régulés, on ne trouve pas dans l'ouvrage de Lecornu d'étude concernant la synthèse des systèmes régulés. Léon Lecornu publiera en 1918 un *Cours de mécanique de l'École Polytechnique* [11], professé, comme son titre l'indique, à l'École polytechnique, dans lequel on retrouve un chapitre sur les régulateurs et les volants.

Dans tous ces enseignements de mécanique du XIXe et du début du XXe siècle, on ne trouve jamais d'études complètes, ni bien sûr de méthodes de synthèse d'un système régulé. Les études se limitent à une analyse théorique ou expérimentale des éléments du système de régulation en aboutissant à des «recommandations».

B. Dans le domaine de l'électricité

A partir des années 1880, le développement des applications industrielles de l'électricité entraîne un besoin de formation d'ingénieurs dans ce domaine. C'est en 1894 qu'est créé l'École supérieure d'électricité de Paris. L'utilisation industrielle de l'électricité est tributaire de la régulation car la production de l'énergie électrique nécessite la régulation de la tension et de la fréquence pour la production de courants alternatifs. Par conséquent, la vitesse des turbines hydrauliques entraînant les

alternateurs doit être maintenue constante. La régulation sera donc très rapidement enseignée dans les écoles d'ingénieurs électriciens. En 1896, Marcel Deprez, professeur au C.N.A.M. et au Collège de France, publie un ouvrage[12] traitant d'électricité industrielle dans lequel figurent des descriptions d'appareils de régulation du courant et du potentiel électrique. L'exemple de l'enseignement d'électricité de Louis Barbillion à l'Institut électrotechnique de Grenoble, comportant une partie sur les techniques de régulation, est représentatif d'une façon d'aborder ce type d'enseignement que l'on retrouvera jusqu'aux années 1950, au sein de l'École grenobloise de la régulation (les cours [13] de Ténot de 1935 et celui d'Alméras [14] de 1955 en sont des exemples probants). Louis Barbillion fut enseignant puis directeur de l'Institut d'électrotechnique de Grenoble. Dans son cours d'électricité industrielle [15] professé durant les trente premières années du XXe siècle, et qui a fait l'objet de plusieurs éditions, il consacre une place à la régulation de vitesse et de tension. Dans l'édition de 1911, on trouve les principales évolutions des régulateurs de vitesse en France au cours de la fin du XIXe et au début du XXe siècle : la régulation directe et indirecte, l'asservissement (de Farcot), la compensation, la régulation simultanée de tension et de vitesse, etc. Il utilise abondamment les représentations graphiques développées à la fin du XIXesiècle, et notamment les diagrammes vitesse-vannage développés par Léauté auxquels il apportera des améliorations. Dans le cours d'André Tenot de 1935 sur les turbines hydrauliques [13], dispensé à l'École nationale des arts et métiers de Châlons-Sur-Marne et à l'École spéciale des travaux publics du bâtiment et de l'industrie de Paris, on trouve une partie traitant d'un enseignement des techniques de régulation de vitesse très proche du contenu de celui de Barbillion ; on retrouve une utilisation des diagrammes de Léauté. Bien entendu, ces enseignements intègrent progressivement et au fur et à mesure de leur apparition les développements de la régulation tels que la compensation (déjà présente dans le livre de Barbillion) ou la régulation accéléro-tachymétrique. Dans tous ces exemples, le contenu de l'enseignement reste très proche de l'aspect technique et n'aborde pratiquement jamais les aspects théoriques de la modélisation des systèmes ou des critères de stabilité. Lorsque la modélisation est abordée, elle l'est toujours de manière fragmentaire (sans prendre en compte l'ensemble de la boucle de régulation) et sans influence sur la réalisation du système régulé. L'utilisation des critères de stabilité reste marginale et effleurée dans ces cours.

4. Premières conférences et premiers enseignements de l'automatique après la seconde guerre mondiale

La série de conférences organisées par Marcel Véron au Conservatoire national des arts et métiers en 1945 et intitulée, La régulation thermique automatique, est destinée aux ingénieurs thermiciens en activité. Elle inaugure une suite de cycle de conférences consacrée aux techniques de régulation qui se dérouleront au cours des années suivantes. C'est sous l'impulsion de Pierre Nicolau que débute l'enseignement de l'automatique au sein d'écoles d'ingénieurs dès 1945.

A. Le rôle pionnier de Pierre Nicolau

Il faut souligner le rôle de l'ingénieur général Pierre Nicolau dans l'instauration d'un cours d'automatique dans les écoles de l'armement au lendemain de la seconde guerre mondiale.



Fig. 2. Pierre Nicolau

En 1945, en tant que directeur des Écoles de l'Armement, l'ingénieur général de l'Armement Pierre Nicolau instaure un cours sur l'Étude des systèmes asservis [16] à l'École nationale de l'Armement dont il est le directeur. En 1948, en tant que directeur de l'Institut supérieur des matériaux et de construction mécanique (le ministre de l'Éducation nationale lui a confié la création de l'Institut supérieur des matériaux et de construction mécanique dans le but d'un «perfectionnement postscolaire des Ingénieurs mécaniciens de nos entreprises privées» [16] comme il l'avait fait pour les Ingénieurs militaires)¹, il transpose le cours précédent et l'adapte à des fins industrielles dans le cadre de la formation dispensée par cet institut. Dans une déclaration de 1955, Pierre Nicolau rappelait que c'était lui qui avait demandé à de jeunes ingénieurs, dont son gendre Pierre Naslin, de se rendre

¹ Déclaration de l'ingénieur général Nicolau extraite de sa conférence inaugurale de l'Institut belge de régulation et d'automatisme à Bruxelles, le 14 octobre 1955.

au congrès de Londres en 1947 pour s'approprier les énormes progrès effectués pendant la guerre :

Je n'avais sans doute pas grand mérite [etc.] en 1945 alors que nos yeux s'ouvraient sur la véritable révolution produite dans la stratégie durant la deuxième guerre mondiale par les miracles de l'électronique, à avertir sans délai nos jeunes ingénieurs des applications de la science de l'automatisme aux matériels d'armement et à leur faire donner le point sur les théories modernes des systèmes asservis. [16]

De même, pour l'enseignement, il rappelait le rôle qui avait été le sien dans l'introduction dès 1945 d'un enseignement de l'automatique puis de sa transposition à l'I.S.C.M.C. :

Peut-être ai-je pu faire un peu figure de prophète et n'ai-je pas été très bien compris toujours lorsque, peu après, je transposais ces enseignements à l'I.S.M.C.M. que j'étais appelé à créer par notre Ministre de l'Éducation Nationale pour le perfectionnement post-scolaire mécaniciens de nos entreprises privées.[16]

B. Le cours de l'Institut supérieur des matériaux et de construction mécanique de Pierre Naslin

Dans cet institut, dès 1948, l'enseignement théorique et la partie calcul des systèmes asservis est assurée par l'ingénieur principal de l'Armement Pierre Naslin, et la partie réalisation et applications par Saintillan, ingénieur général des Armes navales. L'enseignement préalable d'électronique industrielle est dispensé par Colombani, ingénieur principal de l'Air. Le cours comprend 25 conférences colloques de 1h30 et 15 séances de travaux d'application (calcul et réalisation) de 3 heures. Dans la partie *Théorie et calcul* du cours traité par Pierre Naslin comprenant 9 conférences-colloques et 3 séances de travaux d'application, on trouve les chapitres suivants [17]:

- *Notion de système asservi : quelques exemples simples.*
- *Propriétés fondamentales des systèmes électromécaniques linéaires : notion de transmittance, quelques exemples : moteur à courant continu, groupe Ward-Léonard.*
- *Équations fondamentales des systèmes asservis linéaires.*

- *Représentation graphique des transmittances : courbes de gain et de phase, diagramme de Black.*
- *Stabilité des systèmes asservis linéaires.*
- *Précision des systèmes asservis linéaires.*

- *Correcteurs électriques et mécaniques, en cascade et en réaction.*
- *Théorie des systèmes non-linéaires filtrés : application aux systèmes asservis non-linéaires.*
- *Application des systèmes asservis aux mathématiques expérimentales : calculateurs analogiques, simulateurs.*
- *Systèmes à plusieurs variables : analyseurs différentiels, machines-outils à reproduire.*

Ce plan de cours reste encore d'actualité pour une formation à l'automatique de base dans un cursus universitaire, toutes les notions essentielles sont déjà présentes ; on peut noter la présence dans ce cours des systèmes de calcul.

Pierre Naslin fut un de ceux qui contribuèrent à l'introduction dans l'enseignement des nouvelles idées en automatique. Il est ingénieur diplômé de l'École polytechnique et de l'École supérieure d'électricité, ainsi que Licencié ès sciences. De 1943 à 1960, il a occupé divers postes au Laboratoire central de l'Armement. Il a été Directeur des études de l'École nationale de l'Armement de 1960 à 1967, Directeur adjoint des Écoles supérieures de l'Armement terrestre. Il écrit un ouvrage intitulé *Les Systèmes Asservis* [18] en 1951, ouvrage qui sera suivi de nombreux autres.

La revue *Automatisme* publie une série d'articles de Pierre Naslin durant l'année 1956 constituant la colonne vertébrale d'un cours d'automatique [19][20][21][22][23][24][25][26]. Par la suite, son cours remarquable fut longtemps à la source des cours d'automatique qui vont se succéder dans d'autres établissements.



Fig. 3. Pierre Naslin

5. Développement de la formation et de l'enseignement de l'automatique dans les années 1950

Au cours des années 1950, un certain nombre d'événements montrent l'intérêt croissant du monde industriel et du monde institutionnel pour la régulation et l'automatique. En mai 1956, la reconnaissance de l'importance de cette nouvelle science transparait au travers d'une nomination, un article de la revue

Automatisme s'intitule : *Un automaticien, secrétaire général de la Confédération générale des cadres* [27]. En effet, Gilbert Nasse, à l'époque responsable du Centre de recherches et d'essais de l'E.D.F. à Fontenay et spécialiste des techniques de régulation, accède à ce poste important dans la communauté des ingénieurs. Gilbert Nasse a soutenu une Thèse de doctorat en 1947 présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Paris et intitulée *Contribution à l'étude du circuit de régulation*. Il est l'auteur d'un ouvrage en 1949, *Le circuit de régulation* [28], aux éditions Herman & Cie. Il est l'auteur d'une série d'articles parus dans la revue *Automatisme* à partir 1956 sous le titre : *L'automatique linéaire*. Gilbert Nasse utilise dans son livre comme dans ces articles un formalisme d'avant la deuxième guerre mondiale. Par contre, dans son livre, il s'intéresse non seulement aux systèmes simples monovariables, mais aussi aux systèmes multivariables, ce qui est remarquable pour cette époque. C'est un personnage typique de la confrontation des idées anciennes avec les nouvelles idées dans le domaine des techniques de régulation, et la difficulté pour un scientifique d'adopter ces nouvelles méthodes.

Dans un autre registre, le problème des conséquences de l'introduction de l'automatisation dans le monde industriel est évoqué dans un grand nombre d'articles traitant des aspects scientifiques et techniques de ce domaine au cours des années 1940 et 1950. Dans le cadre d'une réflexion sur les conséquences de l'automatisation, Maurice Lachin, rédacteur en chef de la revue *Automatisme*, en accord avec le Comité national de l'organisation française, décide de créer en 1956 une Commission pour l'étude du plein emploi dans le cadre de l'automatisme [6]. Cette commission réunira des personnalités du monde industriel, technique, économique et social ; son but est de déterminer les secteurs d'activité touchés par l'automatisme, les conséquences en termes de nombre d'emplois supprimés ou créés, la qualification requise pour ces emplois, etc. En liaison avec le développement de l'automatisation dans la société française au cours des années 1950, il apparaît comme une nécessité de créer des événements au cours desquels une information sera donnée autour de cette nouvelle science. A Lille, suite à une Journée d'information sur la cybernétique et l'automatisme en décembre 1956 qui a rassemblé industriels, universitaires et institutionnels, il est décidé de créer un Centre lillois d'information et de documentation sur l'automatisme [29]. Parallèlement à toutes ces initiatives, la formation et l'enseignement, au cours des années 1950, subit un développement considérable. La

revue *Automatisme*, créée en janvier 1956, permet de prendre conscience de l'énorme effort de persuasion et d'organisation qu'il a fallu développer au cours de ces années 1950 pour parvenir à imposer une formation pour les ingénieurs en poste et un enseignement à l'intérieur des écoles. A titre d'information, il faut attendre août 1958 pour que la revue *Automatisme* crée une rubrique intitulée *Enseignement* à l'intérieur de laquelle se trouvent des comptes-rendus d'expérimentation d'enseignement sous la forme de plans, de volumes horaires ou de contenus de cours.

A. Formation des ingénieurs en poste

Un organisme joue un rôle très important dans l'organisation de cycle de conférences autour des thèmes de la régulation et de l'automatique au cours des années 1950. Il s'agit du Centre de perfectionnement technique, c'est un centre d'enseignement post-universitaire constitué avec l'appui du ministère de l'Éducation nationale. Au cours des années 1950, le monde industriel de la chimie montre un intérêt pour les systèmes automatisés. Au Salon de la chimie et des matières plastiques de 1954, un symposium est organisé sur le thème très précis du Contrôle et la régulation en sucrerie. Et dans le cadre du salon de 1956, une manifestation d'ambition plus large est organisée par le Centre de perfectionnement technique. Il s'agit d'une journée consacrée à l'Automatisme dans les industries chimiques [30]. Le Centre de perfectionnement technique organise deux cycles de conférences en décembre 1955 et en avril-mai-juin 1956 portant sur les liens entre les systèmes de mesures et la régulation [31]. La deuxième série de conférences est plus ambitieuse, elle propose de présenter les appareils de mesures des domaines tels que l'électronique, l'hydraulique, la thermique, la chimie en liaison avec leurs utilisations en régulation. Parmi les intervenants, l'omniprésent Victor Broïda assure la conférence inaugurale, et les présidents des deux premières conférences sont Pierre Nicolau et Marcel Véron (déjà connus pour leur activité en faveur de l'automatique). Le Conservatoire national des arts et métiers propose un cycle de perfectionnement pour des ingénieurs en poste sous forme d'une formation s'étalant sur deux ans et dispensé par Victor Broïda [32]:

Le Conservatoire National des Arts et Métiers a ouvert en novembre 1956 un cycle de perfectionnement intitulé « Enseignement supérieur de l'automatisme industriel » sous la direction de M. Victor Broïda, qui s'adresse aux ingénieurs et aux techniciens supérieurs. Il comporte une vaste série de conférences et de colloques s'étalant sur deux années, auxquels

s'ajouteront 15 séances de travaux pratiques. Le programme comporte l'étude des organes de mesure (températures, pressions, vide, débits, niveaux, densités et grandeurs cinématiques), puis celles des organes d'amplification et d'exécution, et enfin celle de nombreuses applications à l'automatisme.

Dans le même article de la revue Mesures . Essais . Régulation .Contrôle industriel, il est aussi signalé que les sociétés privées construisant les instruments de mesure et de contrôle organisent des stages de durée variable de formation théorique et pratique au niveau ingénieur (« cas de la société MECI et de la Compagnie des compteurs de Montrouge »).

B. Formation des futurs ingénieurs

Dans l'histoire de l'introduction de l'enseignement de l'automatique en France, on ne peut qu'insister sur le nom de Victor Broïda. Comme on a pu le constater déjà, il a visiblement beaucoup dépensé d'énergie en se consacrant à cette tâche ; d'autre part, il est chargé depuis 1954 d'un cours à l'université de Charleroi, cours qui constitue la matière de son ouvrage qui ne paraîtra qu'en 1957 et intitulé *Automatisme. Régulation Automatique. Servomécanismes* [33]:

[...] Victor Broïda, se consacre avec talent depuis plusieurs années à réaliser la synthèse nécessaire entre les conceptions des techniciens de la régulation automatique classique et celles des servomécanismes électroniciens.

Venant de l'univers de la thermique, donc de l'un des principaux domaines d'application de l'automatique, Victor Broïda est conscient des difficultés que rencontrent la plupart des ingénieurs à s'approprier les nouveaux outils récents de l'automatique. Dans deux articles ayant pour sujet la formation des ingénieurs à l'automatique [34][5], Victor Broïda fait une remarquable synthèse de la situation dans ce domaine au milieu des années 1950. Dans le premier article, il précise clairement l'obstacle principal rencontré au sein des formations : un enseignement trop technologique et orienté, la plupart du temps, vers un seul domaine d'application de l'automatique. Il note sa volonté d'introduire :

des notions parfois assez complexes relevant, par exemple, de l'analyse harmonique ou du calcul symbolique, branches mathématiques dans lesquelles la majorité des ingénieurs spécialisés dans la régulation automatique ne fait que des incursions superficielles.

et de constater que :

cette science de l'automatisme a été longtemps accessible et continue encore à l'être surtout à des physiciens et à des mathématiciens parmi lesquels ceux

qui sont susceptibles d'en tirer le plus grand profit matériel -à savoir, les techniciens de la régulation automatique - ne représentent qu'une assez faible minorité ; seuls, parmi ces techniciens, les spécialistes des servo-mécanismes sont, en raison de la nature même du domaine qui les intéresse, relativement bien familiarisés avec ces bases scientifiques de l'automatisme.

puis de conclure :

Nous estimons [...] que, quelles que soient par ailleurs les formes exactes de la réalisation pratique de cet enseignement [...], le développement chaque jour croissant des applications de l'automatisme dans l'industrie, exige impérativement que dernier ne soit pas enseigné d'une manière fragmentaire. Un enseignement d'ensemble de l'automatisme et de la régulation automatique nous paraît donc être une nécessité vitale pour leur développement harmonieux.

Dans la partie scientifique de cet article, Victor Broïda illustre, sans faire appel à aucun développement mathématique, les principales notions devant constituer un cours, de son point de vue. Il définit la notion de régulateur automatique puis illustre la grande variété technologique des régulateurs. La partie théorique du cours est résumée par les deux méthodes d'étude disponibles : la méthode « a priori (méthode de l'équation différentielle)» et les trois méthodes d'analyse « a posteriori : l'analyse fréquentielle, l'analyse unitaire et l'analyse impulsionnelle ». Pour Broïda, un enseignement complet de « l'automatisme et de la régulation automatique » doit englober « aussi bien leurs aspects théoriques que leurs aspects pratiques ».

Les premières expériences en France d'enseignement de l'automatique ont donc eu lieu à l'École de l'Armement et à l'Institut supérieur des matériaux et de construction mécanique, puis cet enseignement commence à se répandre dans certaines écoles d'ingénieurs. Victor Broïda a pris l'initiative au cours de l'année 1954 d'entreprendre « sur le plan international, une vaste enquête sur l'enseignement de l'Automatisme et de la Régulation ». Les réponses ne permettent pas de statuer sur l'ensemble des écoles d'ingénieurs, il y a eu une dizaine de réponses en France et une dizaine de l'étranger. La partie de l'étude sur la situation française révèle que les villes de Paris, Caen, Grenoble, Lille, Nancy et Toulouse proposent un enseignement de « l'automatisme et des techniques de régulation ». Ces enseignements ne sont pas des cours consacrés à l'automatisme et à la régulation automatique, ils sont pour la plupart parcellaires au regard des critères de Broïda et sont inclus à l'intérieur d'autres cours.

Les enseignements les plus proches des critères émis par Broïda sont les enseignements « des écoles d'ingénieurs-électriciens et qui sont axés plutôt sur la théorie des servomécanismes que sur l'ensemble de l'automatisme et de la régulation automatique ». Selon Broïda, les plus remarquables sont ceux de Naslin à l'École supérieure d'électricité, et d'Esclangon à Grenoble. L'Institut du Génie chimique de Toulouse, qui forme ces ingénieurs à la régulation des procédés physico-chimiques (régulation de pression, de débit, de température, etc.), fait appel à l'analyse impulsionnelle et au calcul symbolique.

Les enseignements existant avant la deuxième guerre mondiale dans les écoles d'ingénieurs autour des techniques de régulation, en dehors du domaine de l'électrotechnique, se poursuivent et restent toujours centrés sur l'approche classique de l'automatique, sans inclure les théories nouvelles. La lente introduction des nouvelles conceptions théoriques, telles que le critère de Nyquist, est illustrée dans le cours de régulation de Paul Alméras de 1955 [14]. Ce cours est dispensé à l'École nationale d'électrotechnique et d'hydraulique de Grenoble et s'inscrit dans la suite des cours donnés au sein de l'Institut électrotechnique de Grenoble. Dans son ouvrage, Paul Alméras fournit une importante bibliographie ; elle commence avec la publication de Maxwell, *On governors* [35], en 1868, et puis suivent les publications de Farcot [36], Léauté [37], Routh [38], des publications étrangères, italiennes, allemandes, puis les travaux de l'école grenobloise, Barbillion, Cayère, Rateau, Eydoux, Gariel. La publication de Nyquist [39] de 1932 est référencée, mais Alméras, dans l'introduction du chapitre intitulé *Critères type Nyquist*, précise :

Nous ne ferons pas ici la théorie et nous ne donnerons pas le critérium sous la forme que lui a donné Nyquist. On trouvera dans la bibliographie, en fin de cours, les références à consulter.

Suit une présentation à l'aide des nombres complexes et de l'analyse vectorielle de la stabilité qui n'est pas, c'est le moins que l'on puisse dire, très claire. L'utilisation du critère de Nyquist reste, en 1955, très difficile à assimiler, comme le montre la présentation d'Alméras, sûrement représentative de l'école de la régulation française. On ne trouve aucune référence aux travaux de Black et de Bode. L'incompréhension des nouvelles méthodes est patente, elle est probablement liée à la formation mathématique dispensée dans la plupart des écoles d'ingénieur à cette époque. Mise à part quelques grandes écoles telles que l'École polytechnique ou l'École supérieure d'électricité, les nouveaux outils de calcul de l'approche fréquentielle, du calcul

symbolique, de la transformée de Fourier et de la transformée de Laplace ne sont pas au programme. Dans la suite de la bibliographie, après la cassure de la deuxième guerre mondiale, les ouvrages français de la fin des années 1940 sont représentés par le livre de Nasse[28] et le livre de Colombani-Lehman-Loeb-Pommelet-Raymond [40] de 1949. Les ouvrages anglo-saxons classiques de cette époque apparaissent dans cette bibliographie, avec par exemple *Theory of servomechanism* [41] de James-Nichols-Philips de 1947 et *Principles of servomechanism* [42] de Brown-Campbell de 1948. Le cours d'Alméras reste très significatif de ce qui se passe dans la plupart des écoles d'ingénieurs à cette époque, les apports des nouvelles méthodes dans le domaine de l'automatique sont apparemment ignorés.

C. Comparaison avec les autres pays européens

Les résultats d'une enquête internationale, entreprise au début de l'année 1954 à l'initiative de Victor Broïda et confiée à F. Demarles, Jean Vivié et Victor Broïda, sont publiés dans un article de la revue *Mesures.Essais.Régulation.Contrôle industriel* en mars 1955 . Dans l'article intitulé, *La situation actuelle de l'enseignement de l'automatique et de la régulation automatique en France et à l'étranger* [34], la situation de l'enseignement est analysée pays par pays, en Allemagne, Belgique, États-Unis, France, Grande-Bretagne et Suisse. Le souci de cette étude est de montrer l'orientation des enseignements existant dans ces différents pays, « le caractère scientifique plus ou moins complet » ou, « au contraire, plutôt orienté vers les aspects purement technologiques ». Malgré son caractère incomplet (une dizaine d'écoles françaises d'ingénieurs et le même nombre pratiquement d'écoles étrangères ont répondu au questionnaire), les conclusions de cette enquête sont très intéressantes. La première remarque concerne « l'extraordinaire dispersion des enseignements de l'automatisme, parmi les diverses disciplines enseignées ». Paradoxalement, un des obstacles à l'introduction d'un cours d'automatique est sa présence au cœur de certaines matières tels que la mécanique ou la thermique. Ces enseignements sont donc naturellement tournés vers les aspects technologiques ou théoriques propres à ces matières. Parmi toutes ces écoles, les auteurs de l'analyse n'ont trouvé :

aucun cours d'automatisme et de régulation automatique comportant, à la fois, un exposé véritablement complet de ses bases théoriques et de nombreux exemples pris dans les techniques variées.

Selon cette étude, c'est en Allemagne, en Belgique et aux États-Unis que l'on trouve des cours « s'élevant

nettement au-dessus des bases théoriques propres à la seule spécialité considérée ». On trouve ces enseignements en Allemagne au sein de la Staatliche Ingenieurschule de Cologne, de la Technische Hochschule de Darmstadt, de la Technische Hochschule de Munich, en Belgique à l'Université du Travail de Charleroi, et aux États-Unis au Massachusetts Institute of Technology. Dans une moindre mesure, on peut associer l'Imperial College of Science and Technology de Londres, l'École polytechnique de l'université de Lausanne et l'Institut Montefiore de Liège.

6. Conclusion

La formation et l'enseignement sont des éléments essentiels de l'introduction de l'automatique en France. Dès 1945, il apparaît nécessaire de propager les avancées théoriques et pratiques développées au cours de la seconde guerre mondiale dans le monde industriel. La difficulté à introduire les nouveaux concepts auprès des ingénieurs en poste est révélatrice de leur état d'esprit. Rien en effet ne les incite à la remise en cause, ni le monde industriel dans lequel ils évoluent, ni leur formation qui, la plupart du temps, a ignoré les concepts mathématiques associés à ces nouvelles techniques : analyse de Fourier, transformée de Laplace et calcul symbolique. Deux hommes se sont distingués dans ce travail, Victor Broïda et Pierre Naslin. La formation de Victor Broïda, ingénieur des Arts et métiers et de l'Institut électrotechnique de Grenoble, ne le préparait pas à l'ouverture d'esprit dont il a fait preuve face au déficit de l'enseignement de l'automatique. Quant à Pierre Naslin, il a incontestablement joué un rôle moteur dans la définition d'un enseignement d'automatique « moderne » avec son livre, *Les Systèmes Asservis* [18], de 1951 et la série d'articles parus dans la revue *Automatisme* en 1956 [19][20][21][22][23][24][25][26].

L'enseignement théorique et appliqué de l'automatique s'est progressivement développé dans les écoles d'ingénieurs de manière dispersée à l'intérieur de différentes disciplines. Broïda, dans son enquête sur l'enseignement de l'automatique en France et à l'étranger, constate qu'il n'existe aucun enseignement complet à la fois des bases théoriques et des grandes applications de « la régulation automatique ». Au milieu des années 1950, l'idée d'une incitation au niveau national commence à apparaître comme le prouve un article de la revue *Automatisme* de février 1956 [43]:

L'intérêt croissant suscité par les applications de l'automatisme et la constatation qu'une nouvelle

discipline scientifique est née qui englobe les principes théoriques qui commandent le développement de l'automatisme, a incité le Ministère de l'Éducation Nationale à se pencher sur la question .

Dans le même article, il est évoqué la décision imminente de la part du Ministère de créer des Chaires d'automatique théorique et appliquée dans les universités françaises. A partir de cette époque, on assiste à la création de certificats spécialisés qui seront à l'origine du développement des troisièmes cycles au sein des universités françaises et des grandes écoles dans le domaine de l'automatique. Au cours des années 1960, l'enseignement supérieur français se dotera de la discipline Électrotechnique-Électronique-Automatique (E.E.A.), à l'intérieur de laquelle sera définitivement enseignée l'automatique au niveau de la maîtrise.

Références

- [1] Patrice Pelpel et Vincent Troger. *Histoire de l'enseignement technique*. Hachette Education, 1993.
- [2] Marcel Véron. La régulation thermique automatique. introduction. *Mesures.Essais.Régulation. Contrôle industriel*, 96 :353–354, mai 1945.
- [3] Jean Vivié. La régulation thermique automatique. à nos lecteurs. *Mesures.Essais.Régulation. Contrôle industriel*, page 353, mai 1945.
- [4] Victor Broïda. Pour un enseignement général du contrôle automatique. *Mesures.Essais.Régulation. Contrôle industriel*, (186) :647–648, novembre 1952.
- [5] Victor Broïda. Un enseignement d'ensemble de l'automatisme et de la régulation automatique est-il une nécessité ? *Mesures.Essais.Régulation. Contrôle industriel*, (213) :75–89, mars 1955.
- [6] Inconnu. Editorial. *Automatisme*, 4 :115, avril 1956.
- [7] Inconnu. Enseignement. *Automatisme*, 8 :314, août 1958.
- [8] Jean Victor Poncelet. *Traité de mécanique appliquée aux machines*. Renard Liège, 1856.
- [9] H. Résal. *Traité de mécanique générale*, volume III. Gauthier-Villars, 1875.
- [10] Léon Lecornu. *Les régulateurs des machines à vapeur*. Dunod, 1904.
- [11] Léon Lecornu. *Cours de mécanique de l'Ecole Polytechnique*, volume III. Gauthier-Villars, 1918.
- [12] Marcel Deprez. *Traité d'électricité industrielle théorique et pratique*. 1896-1900.
- [13] André Tenot. *Turbines hydrauliques et régulateurs automatiques de vitesse. Livre IV. Régulation de la vitesse des groupes turbines-récepteurs*. Eyrolles, 1935.

- [14] P. Alméras. *Cours de Régulation*. Ecole des ingénieurs hydrauliciens de Grenoble (cours non publié), 1955.
- [15] Léon Barbillon. *Cours municipal d'Electricité Industrielle*. L. Geisler, Paris, 1911.
- [16] Inconnu. Enseignement. cours d'automatique appliquée à la mécanique industrielle de l'institut supérieur des matériaux et de la construction mécanique. *Automatisme*, 8 :314–316, août 1958.
- [17] Inconnu. L'enseignement de l'automatique théorique et appliquée à l'institut supérieur des matériaux et de la construction mécanique. *Automatisme*, 2 :73–74, février 1956.
- [18] Pierre Naslin. *Les Systèmes Asservis*. Dunod, 1951.
- [19] Pierre Naslin. La notion de transmittance des systèmes électromécaniques linéaires. *Automatisme*, 3 :83–90, mars 1956.
- [20] Pierre Naslin. La notion de transmittance des systèmes électromécaniques linéaires (ii). *Automatisme*, 4 :116–127, avril 1956.
- [21] Pierre Naslin. Etude simplifiée de la stabilité des systèmes à réaction linéaires (iii). *Automatisme*, 6 :207–213, juin 1956.
- [22] Pierre Naslin. Précision des systèmes à réaction linéaires. *Automatisme*, 7 :259–263, juillet 1956.
- [23] Pierre Naslin. Précision des systèmes à réaction linéaires. *Automatisme*, 9 :322–330, juillet 1956.
- [24] Pierre Naslin. Méthodes de correction des systèmes asservis linéaires. *Automatisme*, 11 :406–412, novembre 1956.
- [25] Pierre Naslin. Méthodes de correction des systèmes asservis linéaires. *Automatisme*, 12 :440–446, décembre 1956.
- [26] Pierre Naslin. Méthodes de correction des systèmes asservis linéaires. *Automatisme*, 2 :54–61, février 1957.
- [27] Inconnu. Un automaticien, secrétaire général de la confédération générale des cadres. *Automatisme*, 5 :191, mai 1956.
- [28] Gilbert Nasse. *Le circuit de régulation*. Herman et Cie, 1949.
- [29] Inconnu. Création d'un centre lillois d'information et de documentation sur l'automatisme. *Automatisme*, 2 :77, février 1957.
- [30] Inconnu. Une journée sur l'automatisme au prochain salon de la chimie. *Automatisme*, 4 :146, avril 1956.
- [31] Inconnu. Une série de conférences sur la mesure et la régulation au centre de perfectionnement technique, n° , , , p. *Automatisme*, 4 :152, avril 1956.
- [32] H. Renard. Formation des spécialistes du contrôle et de la régulation automatique. *Mesures.Essais.Régulation.Contrôle industriel*, 237 :133–135, février 1957.
- [33] Victor Broïda. *Automatisme.Régulation. Automatique.Servomécanismes*. Dunod, 1957.
- [34] Victor Broïda. La situation actuelle de l'enseignement de l'automatisme et de la régulation automatique en France et à l'étranger. *Mesures.Essais.Régulation.Contrôle industriel*, 214 :171–178, 1955.
- [35] James Clerck Maxwell. On governors. *Proceedings of the Royal Society of London*, 16 :270–283, 1868.
- [36] Joseph Farcot. *Le servo-moteur, ou moteur asservi, ses principes constitutifs, variantes diverses, application à la manœuvre des gouvernails*. Paris J. Baudry, 1873.
- [37] Henri Léauté. Mémoire sur les oscillations à longues périodes dans les machines actionnées par des moteurs hydrauliques et sur les moyens de prévenir ces oscillations. *Journal de l'Ecole Polytechnique*, 55, 1885.
- [38] Edward John Routh. *A treatise on the stability of a given state of motion*. Mac Milan, London, 1877.
- [39] Harry Nyquist. Regeneration theory. *Bell System Technical Journal*, 11 :126–147, 1932.
- [40] Pierre Colombani, Gérard Lehman, Julien Loeb, André Pomme-let, et François-Henri Raymond. *Analyse, synthèse et position actuelle de la question des servomécanismes*. Société d'Edition d'Enseignement Supérieur, 1949.
- [41] James, Nichols, et Philips. *Theory of servomechanism*. McGraw-Hill, 1947.
- [42] G. S. Brown et D. P. Campbell. *Principles of the servomechanisms*. John Wiley & Sons, New York, 1948.
- [43] Inconnu. Vers la création de chaires d'automatique théorique et appliquée dans les universités françaises. *Automatisme*, 2 :74, février 1956.



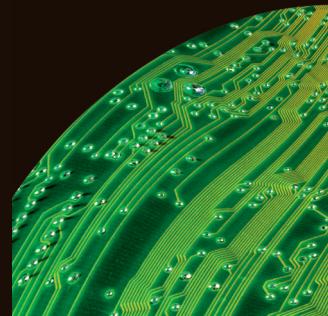
2007
25, 26 & 27 septembre

Paris-Expo
Porte de Versailles
Hall 7.2

Le salon des **composants**, de la **production**,
de la **sous-traitance** et du **test & mesure**



Même lieu, mêmes dates



www.forum-electronique.com



Badge gratuit

Mot de passe : **PUB45**